

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Modulácie pre bezvláknovú optickú sieť
Modulation for Wireless Optical Network**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student:

Tomáš Socha

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Modulace pro bezvláknovou optickou síť
Modulation for Wireless Optical Network

Zásady pro vypracování:

1. Teoretické spracování problematiky modulací pro bezvláknovou optickou síť.
2. Rozbor typů modulací.
3. Simulace pomocí softwaru OptiSystem.
4. Rozbor a vyhodnocení simulací.

Seznam doporučené odborné literatury:


1. RAMIREZ-INIGUEZ, Roberto, Sevia M IDRUS a Ziran SUN. Optical wireless communications: IR for wireless connectivity. Boca Raton: CRC Press, c2008, xxxi, 344 p. ISBN 08-493-7209-7.
2. T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," IEEE Trans. Consum. Electron., vol. 50, no. 1, pp. 100-107, February 2004.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Andrej Líner**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Vyhlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

Dňa: 03.05.2013

.....*Lukáš*.....
podpis študenta

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval Ing. Andrejovi Línerovi za odbornú pomoc a konzultáciu pri vytváraní tejto bakalárskej práce.

Abstrakt

Táto Bakalárska práca sa zaoberá moduláciami použitých pre bezvláknový optický spoj (FSO). V kapitolách sú opísane OFDM a QAM modulácie ktoré sú najpoužívanéjšie v systémoch FSO. Hlavnou úlohou je nasimulovať tieto dve modulácie v programe OptiSystem. Ako prenosové médium má byť použitá atmosféra, keďže sa jedná o bezvláknový optický spoj. Pre nasimulovanie atmosféry bol použitý FSO komponent. Vo FSO komponente boli nasimulované útlmy, ktoré odpovedajú rôznej hustote hmly.

Kľúčové slova

OFDM, QAM, FSO, Cyklický prefix.

Abstract

This thesis is about modulations which are used for FSO system. In the chapters are described OFDM and QAM modulations which are the most used in FSO system. The main task is to simulate two modulations in OptiSystem program. As a transmission medium is used atmosphere because it is talked about free space optics. For the simulation of atmosphere was used FSO component and in FSO component were simulated attenuations which correspond to different density of fog.

Key words

OFDM, QAM, FSO, Cyclic prefix.

Zoznam použitých obrázkov

Obrázok 3.1: Konceptná schéma pre obecný systém nosných modulácií.....	4
Obrázok 3.2: Diagram pre A vysielateľ a B prijímateľ OFDM.	6
Obrázok 3.3: OFDM symbol bez cyklického prefixu u vysielateľa.....	7
Obrázok 3.4: OFDM symbol bez cyklického prefixu na strane prijímateľa.....	7
Obrázok 3.5: OFDM symbol s cyklickým prefixom na strane vysielateľa.....	8
Obrázok 3.6: OFDM symbol s cyklickým prefixom na strane prijímateľa.....	8
Obrázok 3.7: OFDM signál s jedným kompletným OFDM symbolom.....	9
Obrázok 3.8: Optické spektrum.....	10
Obrázok 3.9: FSO - OFDM systém.....	11
Obrázok 3.10: FSO - OFDM systém: Cyklické predĺženie OFDM symbolu.....	12
Obrázok 3.11: FSO - OFDM systém: OFDM symbol po okne (windowing).....	12
Obrázok 4.1: Konštruktívny diagram 16 – QAM.....	14
Obrázok 4.2: Vytvorenie symbolu QAM.....	15
Obrázok 4.3: Univerzálny kvadraturný modulátor.....	15
Obrázok 4.4: Univerzálny kvadraturný demodulátor.....	16
Obrázok 4.5: Orientácia v konštruktívnom diagrame.....	17
Obrázok 5.1: Pracovné prostredie programu OptiSystem.....	18
Obrázok 6.1: Vysielacia časť prenosového systému.....	19
Obrázok 6.2: Generátor bitovej sekvencie.....	19
Obrázok 6.3: QAM sekvenčný generátor.....	19
Obrázok 6.4: OFDM modulátor.....	20
Obrázok 6.5: Bloková schéma modulátora.....	20
Obrázok 6.6: Kvadraturný modulátor.....	20
Obrázok 6.7: CW laser.....	20
Obrázok 6.8: Mach – Zehnder modulátor.....	21
Obrázok 6.9: FSO kanál.....	21
Obrázok 6.10: OFDM prijímateľ.....	22
Obrázok 6.11: Fotodetektor PIN.....	22
Obrázok 6.12: Kvadraturný demodulátor.....	22
Obrázok 6.13: QAM sekvenčný dekodér.....	22
Obrázok 6.14: Konštruktívne diagramy pri 50 a 100 m.....	23
Obrázok 6.15: Konštruktívny diagram pri 500 m.....	23
Obrázok 6.16: Konštruktívne diagramy pre 50 a 100m.....	24
Obrázok 6.17: Konštruktívne diagramy pre 200 a 500m.....	24
Obrázok 6.18: Graf utlmeného výkonu atmosférou.....	25
Obrázok 6.19: Konštruktívne diagramy pre 100 a 500m.....	25
Obrázok 6.20: Konštruktívne diagramy pre 600 a 700m.....	26
Obrázok 6.21: Konštruktívne diagramy pre 500 a 700m.....	26
Obrázok 6.22: Konštruktívne diagramy pre 1500 a 1600m.....	27
Obrázok 6.23: Graf utlmeného výkonu atmosférou.....	27
Obrázok 6.24: Konštruktívne diagramy pre 500 a 1000m.....	28
Obrázok 6.25: Konštruktívne diagramy pre 1100a 1500m.....	28
Obrázok 6.26: Konštruktívne diagramy pre 1000a 1500m.....	29
Obrázok 6.27: Konštruktívne diagramy pre 2500a 2800m.....	29
Obrázok 6.28: Graf utlmeného výkonu atmosférou.....	30
Obrázok 6.29: Vysielateľ pre QAM moduláciu.....	30

<i>Obrázok 6.30: M – ary Pulzný Generátor.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázok 6.31: Prijímač pre QAM moduláciu.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázok 6.32: M – ary prahový detektor.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázok 6.33: Kvadraturný demodulátor.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázok 6.34: 16 – QAM pri 13,5 MHz a pri 10 MHz.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázok 6.35: Konštalačné diagramy pre 50 m a 100 m.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázok 6.36: Konštalačné diagramy pre 110 m a 500 m.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázok 6.37: Konštalačné diagramy pre 50 m a 100 m.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázok 6.38: Konštalačné diagramy pre 200 m a 500 m.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázok 6.39: Graf utlmeného výkonu atmosférou.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázok 6.40: Konštalačné diagramy pre 50 m a 100 m.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázok 6.41: Konštalačné diagramy pre 500 m a 800 m.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázok 6.42: Konštalačné diagramy pre 500 m a 800 m.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázok 6.43: Konštalačné diagramy pre 1000 m a 1500 m.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázok 6.44: Graf utlmeného výkonu atmosférou.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázok 6.45: Konštalačné diagramy pre 500 m a 1000 m.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázok 6.46: Konštalačný diagram pre 1500 m.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázok 6.47: Konštalačné diagramy pre 500 m a 1000 m.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázok 6.48: Konštalačné diagramy pre 1500 m a 2000 m.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázok 6.49: Konštalačný diagram pre 2500 m.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázok 6.50: Graf utlmeného výkonu atmosférou.....</i>	<i>40</i>

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
ADC	Analog-To-Digital Converter	Analógovo-digitálny prevodník
ADSL	Asymetric Digital Subscriber Line	Asymetrické digitálne účastnícke vedenie
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor	Dotovaný kov-oxid polovodič
CO-OFDM	Coherent Optical OFDM	Kohorentné optické OFDM
DAB	Digital Audio Broadcasting	Digitálna rozhlasová technológia
DAC	Digital-To-Analog Converter	Digitálno-analógový prevodník
DVB	Digital Video Broadcasting	Digitálne televízne vysielanie
DDO-OFDM	Direct-Detection Optical OFDM	Optické OFDM s priamou detekciou
DFB	Distributed Feedback Laser	Laser s distribuovanou spätnou väzbou
DFT	Discrete Fourier Transform	Diskrétna Fourierová transformácia
DSB - SC	Double Sideband Suppressed Carrier	Postranné pásmo zdvojnásobí potlčenú nosnú
FFT	Fast Fourier Transform	Rýchla Fourierová transformácia
FSO	Free Space Optics	Bezvláknový optický spoj
ICI	Intercarrier Interference	Vnútoraná nosná interferencia
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform	Inverzná diskretná Fourierová transformácia
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Inštitút elektrických a elektronických inžinierov
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform	Inverzná rýchla Fourierová transformácia
IQ	In-Phase/Quadrature Modulator	Fázovo/kvadratúrny modulátor
ISI	Intersymbol-Interference	Vnútoraná symbolová rušivosť
ITU	International Telecommunication Union	Medzinárodná telekomunikačná únia
LDPC	Low-Density Parity-Check Code	Lineárny samoopravný kód
LTE	Long-Term Evolution	Technológia určená pre vysokorýchlostný internet v mobilných sieťach

MCM	Multicarrier Modulation Class	Trieda nosných modulácií
MZM	Mach–Zehnder Modulator	Mach – Zehnderov modulátor
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ortogonálny multiplex s frekvenčným delením
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Kvadratická amplitúdová modulácia
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Kvadratická modulácia s fázovým klúčovaním
RF	Radio-Frequency	Rádio-frekvenčný
SPC	Serial - Parallel converter	Sériovo paralelný prevodník
VLSI	Very Large-Scale Integrated	Veľmi veľká integrácia
WDM	Wavelength-DivisiOn Multiplexing	Vlnový multiplex
WiMAX	World Interoprability For Microwave Access	Bezdrôtová telekomunikačná technológia
WiFi	Wirless Fidelity	Bezdrôtová sieť

Obsah

1	Úvod.....	1
2	FSO (Free – Space Optics).....	2
	2.1 Princíp FSO	2
	2.2 Výhody FSO.....	2
	2.3 Nevýhody FSO	2
3	OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	3
	3.1 História OFDM.....	3
	3.2 Základy OFDM	3
	3.2.1 Matematické vyjadrenie OFDM signálu	3
	3.2.2 Diskrétna Fourierová transformácia použitá v OFDM	5
	3.2.3 Cyklický prefix použitý pre OFDM	6
	3.2.4 Spektrálna účinnosť pre optické OFDM.....	9
	3.3 OFDM v FSO komunikačnom systéme	10
	3.3.1 FSO-OFDM prenosový systém	10
4	QAM (Qadrature amplitude modulation).....	14
	4.1 Princíp QAM modulácie.....	14
	4.2 Modulátory QAM.....	15
	4.3 Demodulátory QAM.....	16
	4.4 Výhody a nevýhody QAM modulácie.....	16
	4.5 Rozdelenie QAM modulácie	17
	4.6 Konštalačné diagramy	17
5	Popis softvéru OptiSystem 11.0 od firmy Optiwave.....	18
	5.1 OptiSystem 11.0	18
	5.2 Užívateľské rozhranie.....	18
6	Simulácie v programe OptiSystem.....	19
	6.1 Modulácia OFDM	19
	6.1.1 Vysielač	19
	6.1.2 Prenosové médium	21
	6.1.3 Prijímač.....	22
	6.1.4 Namerané výsledky	22
	6.2 Modulácia QAM.....	30
	6.2.1 Vysielač	30
	6.2.2 Prijímač.....	31
	6.2.3 Namerané výsledky	32

7	Záver.....	41
8	Použitá literatúra.....	42
9	Zoznam príloh	43

1 Úvod

Moja bakalárska práca sa zaoberá moduláciami, ktoré sa používajú pre bezvláknový optický spoj. Prácu som rozdelil do viacerých kapitol. V teoretickej časti sa zaoberám bezvláknovým optickým spojom. V krátkosti som opísal princíp, výhody a nevýhody bezvláknového optického spoja. V ďalších kapitolách som následne opísal modulácie OFDM a QAM. Pri OFDM modulácii je spomenutý princíp fungovania OFDM, matematické vyjadrenie signálu, Fourierovú transformáciu a používaný cyklický prefix. Uviedol som aj blokové schéma OFDM používané pre bezvláknový optický spoj. V nasledujúcej kapitole je popísaná modulácia QAM, kde som uviedol jej princíp fungovania, vytvárania jednotlivých stavov a konštalačné diagramy.

V praktickej časti sa zaoberám simuláciami OFDM a QAM. Zapojenie je realizované v programe OptiSystem 11.0. Uviedol som aj jeho stručný popis. V kapitolách sú následne popísané jednotlivé bloky použité v zapojení. Sú tam zobrazené schémy zapojení, ktoré som rozdelil na dve časti a to vysielačiu časť a prijímaciu časť. Pri bezvláknovej optike je ako prenosové médium použitá atmosféra. Tú som nasimuloval FSO komponentom, ktorý je popísaný v kapitole 6. Uviedol som taktiež tabuľku jednotlivých útlmov hmly, ktoré sú vypočítané s takzvaného Kim modelu. Merania sú simulované pre tri rôzne útlmy hmly. Rozhodol som sa pre hustú, strednú a slabú hmlu. Nakoniec som uviedol výsledky meraní tzv. konštalačné diagramy pri jednotlivých vzdialenostiach a simulovanej hmle.

2 FSO (Free – Space Optics)

FSO komunikácia používa na prenos modulované viditeľné alebo infračervené svetlo, ktoré sa potom prenáša v atmosfére. Rovnako ako káblová optika aj FSO využíva k prenášaní dát laser, ale dátový tok nie je prenášaný v sklenenom vlákne ale vo vzduchu. Rozdiel je vlastne len v prenosovom médiu. FSO pracuje na rovnakom základnom princípe ako infračervené diaľkové ovládače alebo bezdrôtové klávesnice. Táto technológia nevyžaduje drahé optické káble ani zaistenie licenčného pásma ako to je u rádiových sietí.

2.1 Princíp FSO

Technológia je založená na prepojení bezdrôtových optických jednotiek, ktoré sa skladajú z vysielача a prijímača, poskytuje full-duplex (obojsmerný prenos). Každá z jednotiek používa optický zdroj, šošovku, alebo teleskop, ktorý prepúšťa svetlo do atmosféry na iný objektív, ktorý je príjemcom informácie. Čo sa týka vysielача, musí byť dostatočne výkonný, aby dosvietil na danú vzdialenosť. Prijímač musí mať zase veľkú citlivosť. Používa sa najčastejšie pre spojenie bodu s bodom (point-to-point), ale môžu byť použité aj spojenie bod s viac bodmi (point-to-multipoint). Prenosová rýchlosť sa pohybuje okolo 100 Mbit/s až 2,5 Gbit/s. V budúcnosti by FSO mala byť schopná dosahovať rýchlosti až 10 Gbit/s pomocou WDM. Systémy FSO môžu fungovať na veľké vzdialenosti, ale musí byť medzi vysielачom a prijímačom zabezpečená priama viditeľnosť. Signál, ktorý ide z bodu do bodu, je veľmi ťažké zachytiť, preto je tento systém veľmi bezpečný.

2.2 Výhody FSO

- Nevyžaduje žiadne licenčné pásmo.
- Je odolná voči rádiovému frekvenčnému pásmu.
- Odolná voči sýtosti farieb.
- Nevyžaduje žiadne upgrady bezpečnostného softwaru.
- Môže byť umiestnená za oknami.
- Malý rozptyl vyžarovaného lúča, ktorý umožňuje použiť na malom mieste viac optických jednotiek bez vzájomného rušenia.

2.3 Nevýhody FSO

- Veľká citlivosť na vplyv prostredia (hmla, sneženie, dážď, slnečný svit).
- Vysoká cena.
- Nebezpečenstvo poškodenia zraku pri nedbalom zaobchádzaní.
- Malý pracovný dosah (1 až 5 km).
- Chvenie budov – spôsobuje vychýlenie vyžarovaného lúča. [1] [7]

3 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

3.1 História OFDM

Koncept OFDM bol najskôr predstavený Changom RW. v referáte roku 1966. Ale termín “OFDM“ sa prvý krát objavil v patente v roku 1970. Pole OFDM bolo dlho vyvíjané pre okrajový záujem vojenských aplikácií, pretože bol nedostatok širokopásmových aplikácií pre OFDM a výkonných integrovaných elektrických obvodov k podpore požadovaných komplexných výpočtov OFDM. Avšak, príchod širokopásmových digitálnych aplikácií a vyvíjaných integrovaných čipov (VLSI) CMOS v roku 1990 zapríčinilo to, že OFDM sa stalo stredom pozornosti. V roku 1995 bol OFDM osvojený ako európsky štandard DAB, zaručujúci dôležitú modulačnú technológiu a ohlasuje novú éru úspechu OFDM v širokej škále aplikácií. Medzi významné štandardy zahrňujúce OFDM modulačnú technológiu patria Európske DVB, bezdrôtové lokálne siete (WiFi, IEEE 802.11 a/g), bezdrôtové metropolitné siete (WiMAX), (ADSL, ITU G .992.1) a štvrtá generácia mobilných komunikačných technológií LTE.

Použitie OFDM v optických komunikáciách sa vyskytuje prekvapivo neskôr, aj keď skratka OFDM bola skôr použitá pre (Optical Frequency Division Multiplexing) optický multiplex s kmitočtovým delením, až neskôr bola premenovaná na Ortogonálny mutiplex s kmitočtovým delením. Prvú dostupnú literatúru o optickom OFDM vydal v roku 1996 Pan Q. a Green RJ a pokračovali vo výskumu OFDM pre optické komunikácia ďalších pár rokov.

3.2 Základy OFDM

OFDM patrí k hraničnej skupine modulácií s viacej nosnými vlnami, kde sú informácie prenesené cez subnosné vlny s nižším dátovým tokom, prenosovou rýchlosťou. Je používaný hlavne v širokopásmových drôtových a bezdrôtových komunikáciách. OFDM zabezpečuje veľmi veľkú odolnosť signálu voči rušeniu, chromatickej disperzie a polarizačnej vidovej disperzie. Modulačná metóda spočíva v použití niekoľkých stoviek až tisíc subnosných vln. Subnosné vlny sú ďalej modulované podľa potreby rôznymi druhmi modulácií napr. QPSK, QAM-16, QAM-64. Jednotlivé subnosné vlny sú navzájom ortogonálne, takže maximum každej nosnej vlny by sa malo prekryvať s minimami ostatných. Dátový tok celého kanálu sa tak delí na stovky čiastkových dátových tokov jednotlivých subnosných vln.

3.2.1 Matematické vyjadrenie OFDM signálu

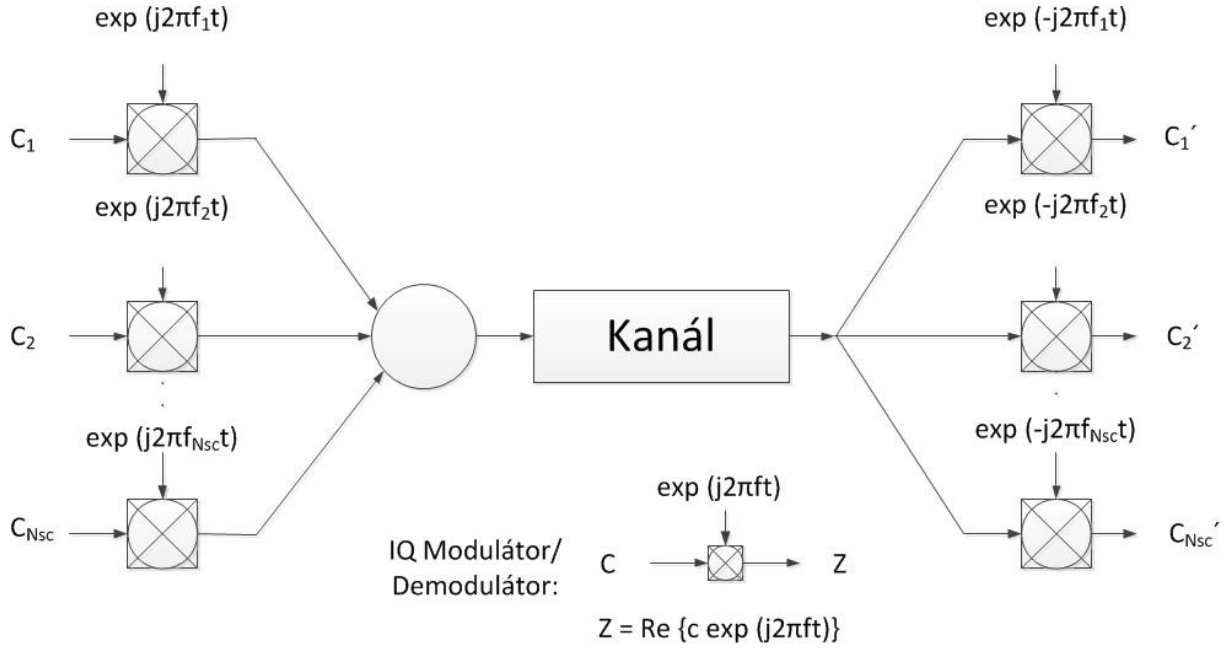
OFDM je špeciálna trieda nosných modulácií MCM. MCM vysielací signál je reprezentovaný nasledujúcim vzťahom:

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{N_{SC}} c_{ki} s_k(t - iT_s), \quad (3.1)$$

$$S_k = \Pi(t) e^{j2\pi f_k t}, \quad (3.2)$$

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1, & (0 < t \leq T_s) \\ 0, & (t \leq 0, t > T_s) \end{cases}, \quad (3.3)$$

C_{ki} predstavuje i -ty informačný symbol v k -tej subnosnej vlne, S_k je priebeh k -tej subnosnej vlny, N_{SC} je počet subnosných vln, f_k je frekvencia subnosných vln, T_s predstavuje periódu symbolu, a $\Pi(t)$ je funkcia tvarovania pulzov. Obecná implementácia a štruktúra komplexu násobiča (IQ modulátor/demodulátor), ktorý je bežne používaný v systémoch MCM je znázornený na obrázku 3.1.



Obrázok 3.1: Konceptná schéma pre obecný systém nosných modulácií.

Optimálny detektor pre každú subnosnú vlnu môže použiť porovnávací filter, ktorý odpovedá priebehu subnosnej vlny, alebo kolerátor pre subnosnú vlnu, ako je znázornené na obrázku 3.1. Z tohto dôvodu detekčný informačný symbol c'_{ik} na výstupe kolerátoru je daný nasledujúcim vzťahom:

$$c' = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iT_s) s_k dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iT_s) e^{-j2\pi f_k t} dt, \quad (3.4)$$

kde $r(t)$ je prijatý signál v časovej oblasti. Hlavnou nevýhodou MCM je, že vyžaduje nadmernú šírku pásma. To je spôsobené tým, že pre efektívny návrh filtrov a oscilátorov musí byť kanálová rozteč násobkom prenosovej rýchlosti, čo značne znižuje spektrálnu účinnosť. Nový prístup OFDM bol ošetrený tým, že zamestná prekrývajúcu sa ortogonálnu signálnu sadu. Táto ortogonalita pochádza z jasného vzťahu medzi dvoma subnosnými vlnami a je daná nasledujúcim vzťahom:

$$\delta_{kl} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s_k s_l dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \exp(j2\pi(f_k - f_l)t) dt = \exp(j\pi(f_k - f_l)T_s) \frac{\sin(\pi(f_k - f_l)T_s)}{\pi(f_k - f_l)T_s}, \quad (3.5)$$

Je vidieť, že ak je splnená táto podmienka:

$$f_k - f_l = m \frac{1}{T_s}, \quad (3.6)$$

tak potom tieto dve subnosné vlny sú navzájom kolmé. To znamená že tieto ortogonálne subnosné súpravy s ich frekvenčným rozstupom násobku inverzných symbolov periód, môžu byť porovnané s filtermi v rovnici 3.4 bez vnútorného nosného rušenia ICI a to napriek signálom so silným spektrálnym prekrývaním.

3.2.2 Diskrétna Fourierová transformácia použitá v OFDM

Základnou úlohou v OFDM je, že veľké množstvo subnosných vln je potrebných preto, aby prenosový kanál mal vplyv na každú subnosnú vlnu ako plochý kanál. To vedie k mimoriadne zložitej architektúre zahrňujúcej mnoho oscilátorov a filtrov na strane prijímača aj vysielača. OFDM modulácia a tak tiež demodulácia môže byť implementovaná pomocou inverznej diskkrétnej Fourierovej transformácie (IDFT) alebo iba pomocou diskkrétnej Fourierovej transformácie (DFT). To vidieť z rovnice 3.1 a 3.4. Keď vynecháme v rovnici 3.1 index i a N_{sc} nahradíme N a predpokladáme že máme vzorku $s(t)$ v každom intervale T_s/N tak m – tá vzorka bude vypadáť takto:

$$S_m = \sum_{k=1}^N c_k \cdot e^{j2\pi f_k \frac{(m-1)T_s}{N}}, \quad (3.7)$$

Pomocou ortogonálneho stavu rovnice 3.6 a konvencie

$$f_k = \frac{k-1}{T_s}, \quad (3.8)$$

a dosadením rovnice 3.8 do rovnice 3.7, dostaneme:

$$S_m = \sum_{k=1}^N c_k \cdot e^{j2\pi f_k \frac{(m-1)T_s}{N}} = \sum_{k=1}^N c_k \cdot e^{j2\pi f_k \frac{(k-1)(m-1)}{N}} = \mathfrak{F}^{-1}\{c_k\}, \quad (3.9)$$

kde \mathfrak{F} je Fourierová transformácia a $m \in [1, N]$. Podobným spôsobom na prijímacej strane dôjdeme k

$$c'_k = \{r_m\}, \quad (3.10)$$

kde r_m je prijímaný signál vzorky v každom intervale T_s/N . Z rovníc 3.9 a 3.10 vyplýva, že diskrétna hodnota prenášaného OFDM signálu $s(t)$ je jednoduchá N-bod IDFT z informačného symbolu c_k , a získaný informačný symbol c'_k je jednoduchý N-bod DFT z príjmu vzorkovaného signálu.

Existujú dve kritické zariadenia pre DFT a IDFT implementáciu:

1. Digitálny – analógový prevodník (DAC) je potrebné previesť diskretnú hodnotu s_m na analógovú hodnotu $s(t)$.
2. Analógovo – digitálny prevodník (ADC) je potrebné previesť trvale prijímaný signál $r(t)$ na diskretné vzorky r_m .

Existujú dve základné výhody DFT/IDFT implementovanej v OFDM. Po prvé v dôsledku existencie efektívneho IFFT/FFT algoritmu, sa počet komplexných násobení pre IFFT v rovnici 3.9 a FFT v rovnici 3.10 znižuje z N^2 na:

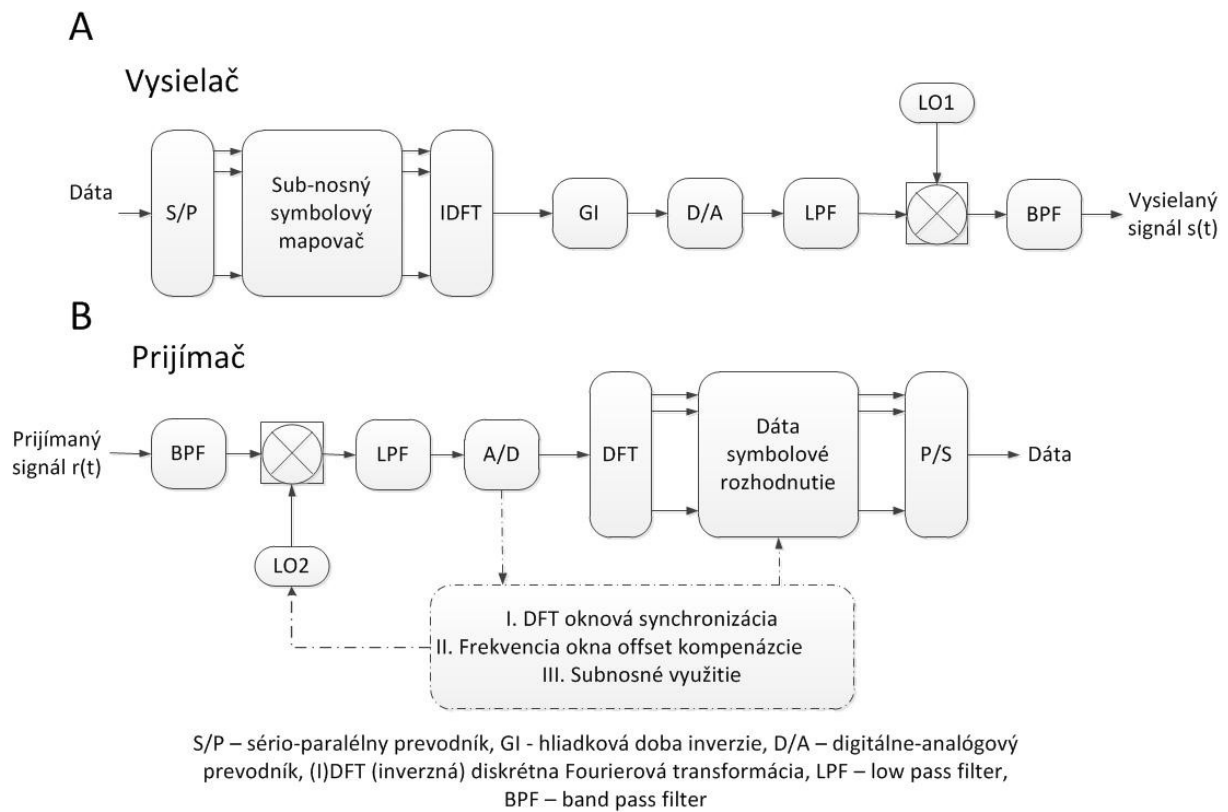
$$\frac{N}{2} \log_2(N), \quad (3.11)$$

takmer lineárne s počtom subnosných vln N . Po druhé môže byť veľký počet ortogonálnych subnosných vln generovaných a demodulovaných aj bez použitia zložitejších RF oscilátorov a filtrov. To vedie k relatívne jednoduchšej architektúre OFDM pri použití viac subnosných vln. Architektúra pomocou DFT/IDFT a DAC/ADC je znázornená na obrázku 3.2. Na vysielačnej strane sú vstupné

sériové dátové bity najskôr prevedené na veľký počet dátových tokov, s ktorých každý má zmapovaný zodpovedajúci informačný symbol pre subnosné vlny v rámci jedného OFDM symbolu a digitálna časová oblasť signálu sa dosiahne použitím IDFT, ktorá je následne vložená s ochranným intervalom a premenená v reálnom čase cez DAC priebeh. Ochranný interval je vložený, aby sa zabránilo intersymbolovej - interferencii (ISI) kvôli kanálovej disperzii. V základnom pásme môže byť signál prevedený na vhodné pásmo RF priechodu s IQ mixer/modulátorom. V rovnici 3.7 je OFDM signál s_m periodickou funkciou f_k s periódou N/T_s . Preto každá samostatná subnosná vlna s presnou frekvenčnou zložkou počas jedného obdobia N/T_s je rovnocenná. Konkrétne v rovnici 3.7 a 3.8 subnosná frekvencia f_k a jej index k je možné zovšeobecniť:

$$f_k = \frac{k-1}{T_s}, k \in [k_{\min} + 1, k_{\min} + N], \quad (3.12)$$

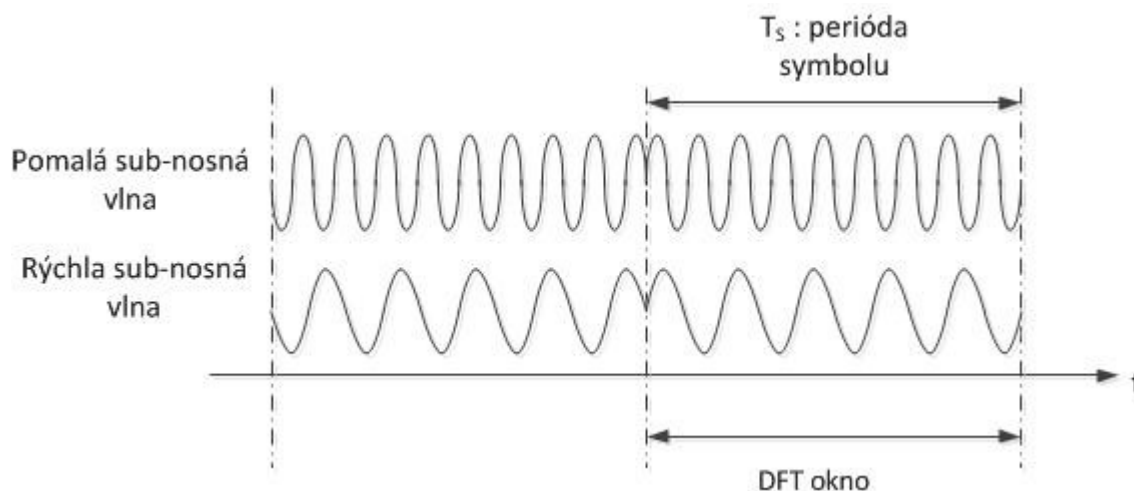
kde k_{\min} je ľubovoľné celé číslo. Iba dve konvencie sú najčastejšie používané: $k \in [1, N]$ a $k \in [-N/2 + 1, N/2]$. Tieto dve konvencie sú matematicky ekvivalentné.



Obrázok 3.2: Diagram pre A vysielač a B prijímač OFDM.

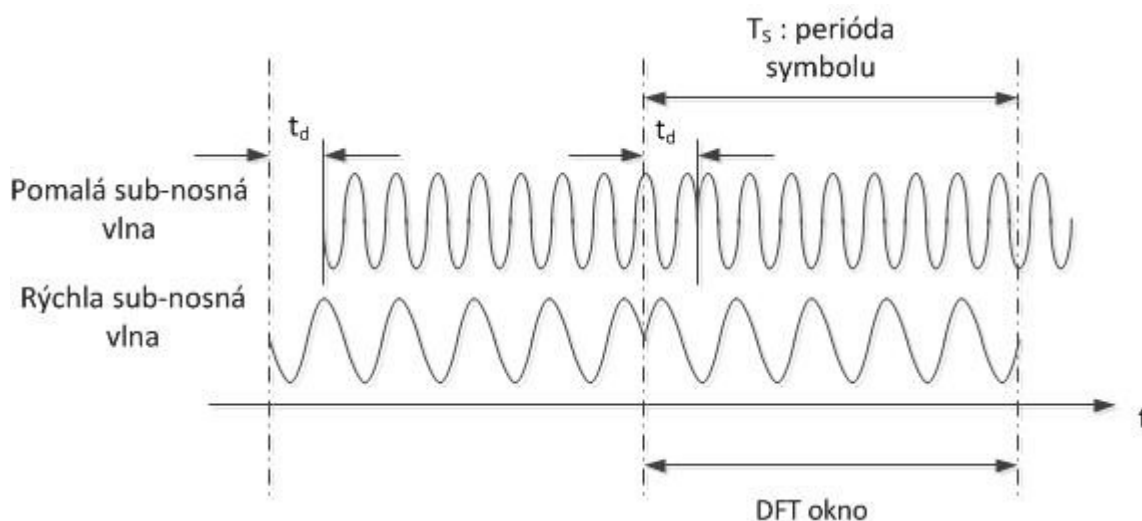
3.2.3 Cyklický prefix použitý pre OFDM

Jednou z upravených techník pre OFDM je vloženie takzvaného cyklického prefixu. Máme dva po sebe idúce OFDM symboly, ktoré prechádzajú disperzným kanálom s oneskoreným šírením t_d . Pre jednoduchosť každý OFDM symbol obsahuje iba dve subnosné vlny s rýchlym oneskorením alebo pomalým oneskoreným šírením t_d . Na obrázku 3.3 vidíme, že vo vnútri každého OFDM symbolu sú dve rýchle subnosné vlny a dve pomalé subnosné vlny zamerané na prenos.



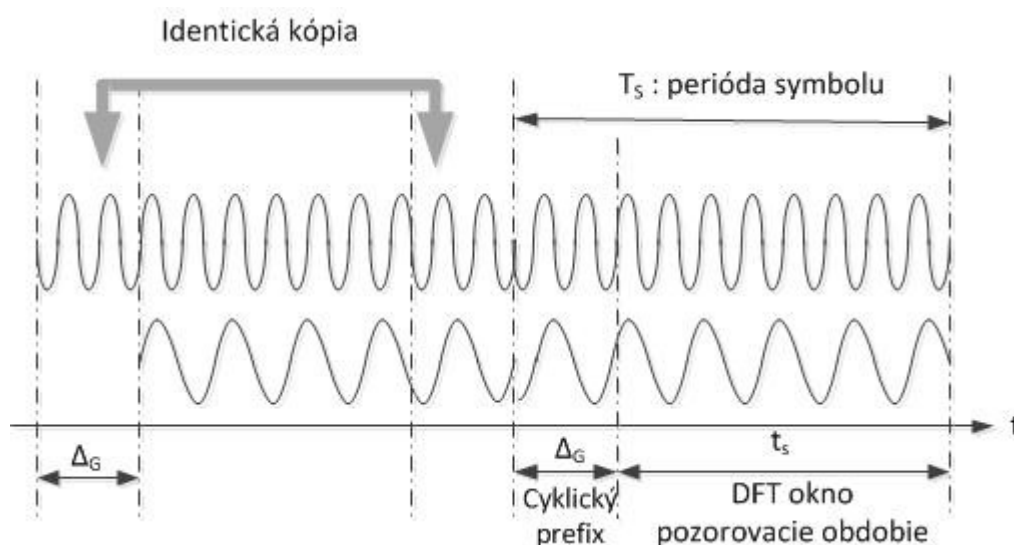
Obrázok 3.3: OFDM symbol bez cyklického prefixu u vysielača.

Na obrázku 3.4 vidíme rovnaké OFDM signály na prijíme, kde pomalá subnosná vlna mešká t_d oproti rýchlej subnosnej vlne. Vyberieme DFT okno, ktoré obsahuje kompletný OFDM symbol pre rýchlu subnosnú vlnu. Je vidieť, že vzhľadom na kanálovú disperziu, pomalá subnosná vlna prekročila hraničný symbol, čo vedie k rušeniu medzi susednými OFDM symbolmi tzv. ISI. Navyše pretože OFDM priebeh v DFT okne pre pomalé subnosné vlny je neúplný, je kritický stav ortogonalita pre stratené subnosné vlny rovnica 3.5, výsledkom toho je ICI penalizácia.



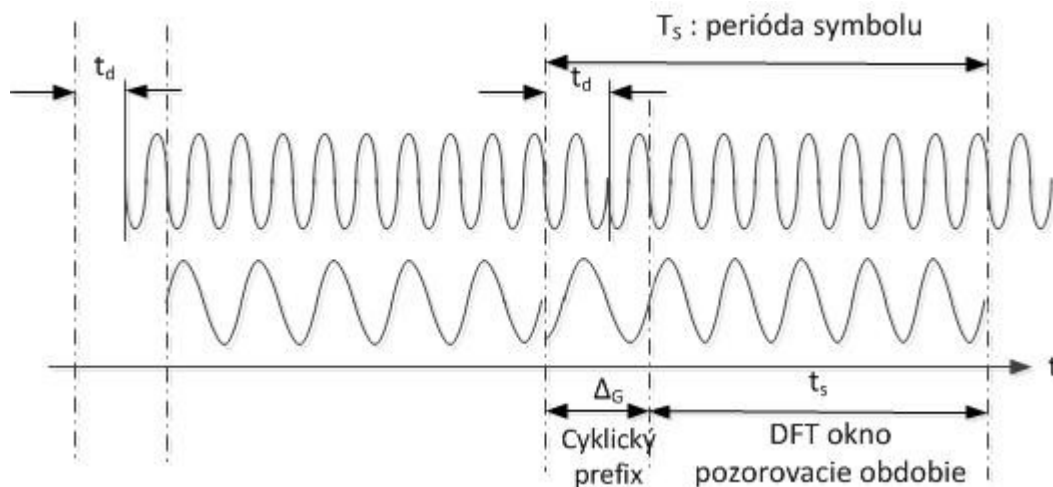
Obrázok 3.4: OFDM symbol bez cyklického prefixu na strane prijímača.

Cyklický prefix bol navrhnutý preto, aby sa odstránila kanálová disperzia vyvolaná ISI a ICI. Obrázok 3.5 ukazuje vloženie cyklického prefixu, čo spôsobí cyklické predĺženie OFDM priebehu do ochranného intervalu Δ_G . Ako je znázornené na obrázku 3.5, priebeh ochranného intervalu je presná kópia priebehu v DFT okne s časovým posunom t_s .



Obrázok 3.5: OFDM symbol s cyklickým prefixom na strane vysielača..

Na obrázku 3.6 vidíme signál OFDM s ochranným intervalom po prijatí. Na obrázku 3.6 taktiež vidíme že kompletý OFDM symbol pre pomalé subnosné vlny je tiež udržiavaný v DFT okne, pretože časť cyklického prefixu sa presunie do okna DFT a nahradí časť, ktorá sa presunula von.



Obrázok 3.6: OFDM symbol s cyklickým prefixom na strane prijímača.

Symbol OFDM pre pomalé subnosné vlny je takmer identická kópia vysielaných priebehov s ďalším fázovým posunom. Dôležitá podmienka ISI-free bez prenosu OFDM je daná nasledujúcim vzťahom:

$$t_d < \Delta_G. \quad (3.13)$$

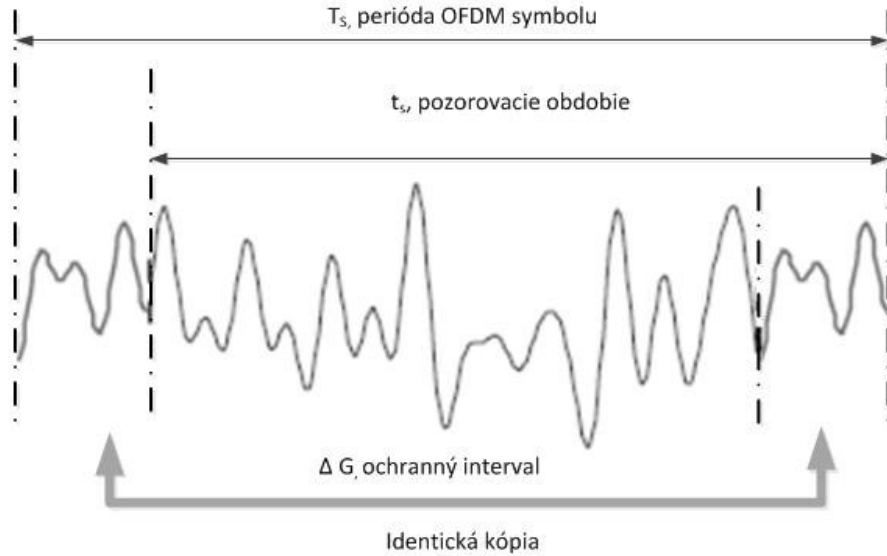
Z toho vyplýva, že k správne obnoveniu OFDM symbolu, existujú dva kritické postupy ktoré je potrebné vykonávať, a to sú:

1. Výber vhodného DFT okna, tzv. DFT synchronizačné okno.
2. Odhad fázového posunu pre každú subnosnú vlnu, tzv. kanálový odhad.

Elegantný spôsob, ako opísať cyklický prefix, je udržať rovnaké vyjadrenie ako v rovnici 3.1 pre vysielaný signál $s(t)$, ale rozširuje funkciu šírky pulzu rovnica 3.2 na ochranný interval, ktorý je daný nasledujúcim vzťahom:

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1, & (-\Delta_G < t \leq t_s) \\ 0, & (t \leq -\Delta_G, t > t_s) \end{cases}, \quad (3.14)$$

Zodpovedajúca časová oblasť OFDM symbolu je znázornená na obrázku 3.7, ktorý ukazuje jeden kompletný symbol OFDM zložený z periódy a cyklického prefixu.



Obrázok 3.7: OFDM signál s jedným kompletným OFDM symbolom.

3.2.4 Spektrálna účinnosť pre optické OFDM

V DDO-OFDM systémoch optické spektrum zvyčajne nie je priama napodobenina RF spektra, a preto optická spektrálna účinnosť je závislá na podrobnej implementácii. Preto sa budeme venovať optickej spektrálnej účinnosti v CO-OFDM systémoch. V CO-OFDM systémoch sú každé N_{SC} subnosné vlny prenášané v každej perióde T_s OFDM symbolu. Preto je celková prenosová rýchlosť v CO-OFDM systémoch daná:

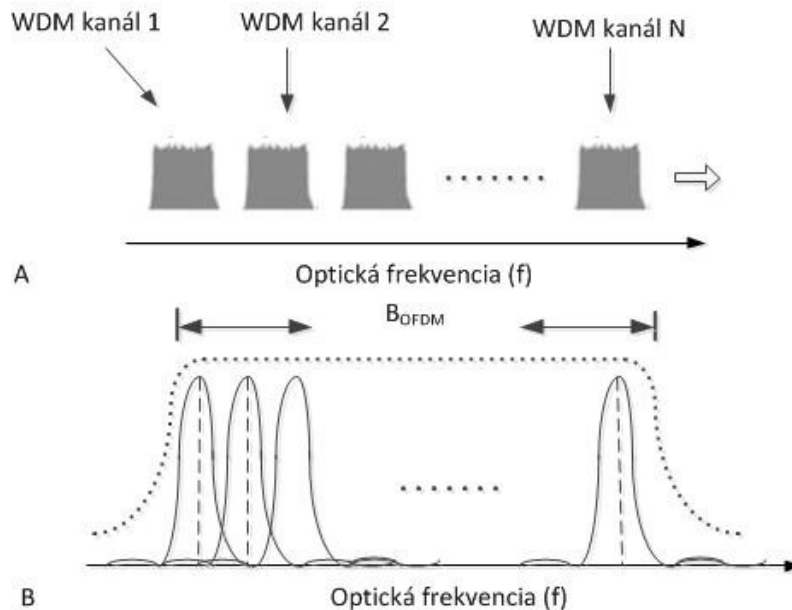
$$R = N_{SC} / T_s. \quad (3.15)$$

Na obrázku 3.8a vidíme vlnový multiplex (WDM) kanálov, každý s CO-OFDM moduláciou, a obrázok 3.8b ukazuje zväčšenie optického spektra pre každý kanál. Používame šírku pásma „first null“, ktorá označuje hranice jednotlivého vlnového kanálu. Šírka pásma OFDM, B_{OFDM} je daná:

$$B_{OFDM} = \frac{2}{T_s} + \frac{N_{SC} - 1}{t_s}, \quad (3.16)$$

kde t_s je doba pozorovania vid'. Obrázok 3.4. Za predpokladu, že je použitých veľa subnosných vln sa účinná šírka pásma OFDM η vyjadri nasledovne:

$$\eta = 2 \frac{R}{B_{OFDM}} = 2\alpha, \alpha = \frac{t}{T_s}. \quad (3.17)$$



Obrázok 3.8: Optické spektrum pre (a) vlnový multiplex WDM, CO-OFDM kanály, (b) zväčšený OFDM signál pre jednu vlnovú dĺžku.

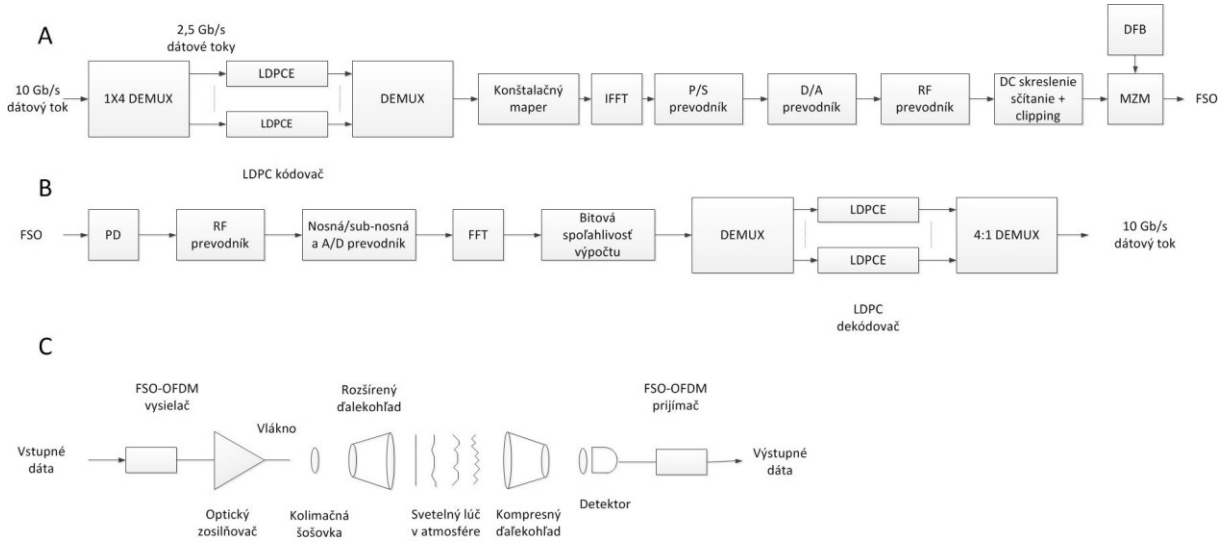
Spektrálna účinnosť môže byť zvýšená použitím vyššieho rádu QAM modulácie. Pri praktickej realizácii CO-OFDM systémov, bude spektrálna účinnosť znížená vzhľadom na potrebu dostatočného ochranného pásma medzi kanálmi WDM. Tohto ochranného úseku sa dá zbaviť pomocou ortogonalít cez WDM kanál.

3.3 OFDM v FSO komunikačnom systéme

3.3.1 FSO-OFDM prenosový systém

FSO-OFDM systémy podporujú vysokú prenosovú rýchlosť oddelením veľkého dátového toku od počtu malých dátových tokov a vysielajú ju cez veľa úzkopásmových subnosných vln. Úzkopásmové subnosné dáta zaznamenávajú menšie skreslenie ako vysokorýchlostné a nevyžadujú vyrovnanie. Požadované spracovanie signálu sa najviac vykonáva v RF oblasti. To je výhodné, lebo mikrovlnné prístroje sú oveľa viac rozvinuté ako optické a pretože frekvenčná selektivita mikrovlnných filtrov a stabilita frekvenčných mikrovlnných oscilátorov je v podstate lepšia ako u optických zariadení. Okrem toho, úroveň fázového šumu mikrovlnných oscilátorov je výrazne nižšia ako u DFB laserovej diódy, čo znamená že RF koherentná detekcia je jednoduchšia na implementáciu ako optická koherentná detekcia. Podľa tohto môžeme aplikovať najmodernejšie koherentné modulačné formáty už vyvinuté pre bezvláknovú komunikáciu.

Základná FSO-OFDM konfigurácia vysielača a prijímača je zobrazená na obrázku 3.9a, 3.9b, respektíve zodpovedajúce FSO prepojenie je zobrazené na obrázku 3.9c.



Obrázok 3.9: FSO - OFDM systém: (a) strana vysielajúca, (b) strana prijímača, (c) FSO link. LDPCD, LDPC – kóder, LDPCD, LDPC – dekodér, MZM - dual-drive Mach–Zehnder modulátor, P/S – paralelne – sériový prevodník, DFB – laser, Clipping – forma skreslenia krivky.

10 Gbit/s dátový tok je demultiplexovaný do štyroch 2,5 Gbit/s tokov, a každý je kódovaný rovnakým LDPC kódom. LDPC kódované výstupy sú následne demultiplexované a analyzované do skupiny B bitov. B bity sa v každej skupine delia na K podskupín, i-ta podskupina obsahuje b_i bitov. b_i bity s i-tej podskupiny sú mapované do komplexnej hodnoty signálu z 2^{b_i} bodov konštalného signálu ako kvadratická amplitúdová modulácia QAM. Komplexné hodnoty signálových bodov zo subkanálu K sú považované za hodnoty diskretnej Fourierovej transformácie z viac nosného signálu OFDM. Preto doba medzi dvoma po sebe nasledujúcimi OFDM symbolmi v systéme OFDM je $T = KT_s$, kde T_s je interval medzi dvoma po sebe nasledujúcimi symbolmi a je ekvivalentný s jedným nosným systémom. Pri výbere K, dostatočne veľkého subkanálu, OFDM intervalové symboly ide vytvoriť významne väčšie než šírku disperzného pulzu v jednom nosnom systéme, čo vedie k ľubovoľne malej intersymbolovej interferencii (symbolová rušivosť). Prenášaný signál OFDM ide zapísať nasledujúcim vzťahom:

$$s(t) = S_{OFDM}(t) + D, \quad (3.18)$$

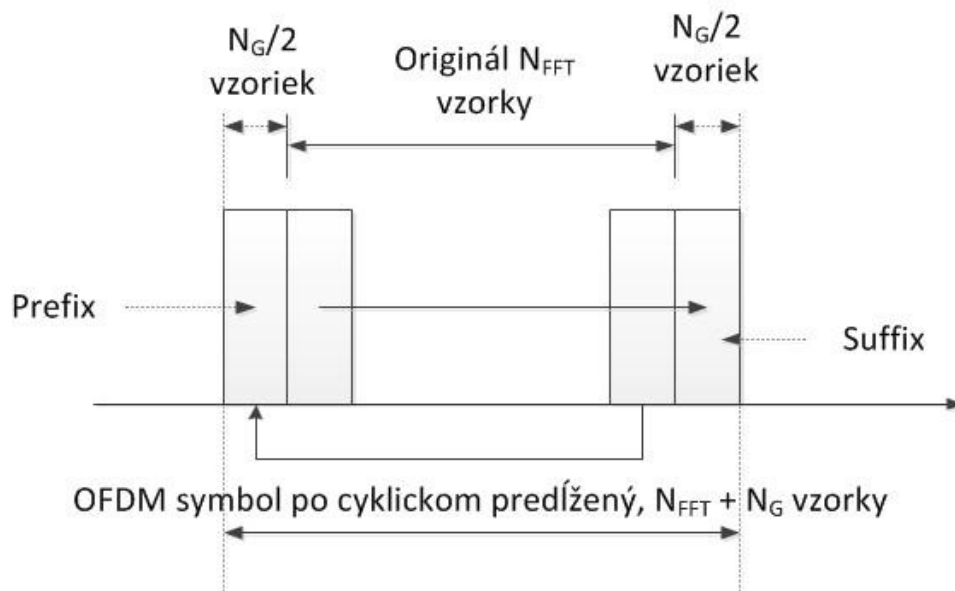
kde

$$S_{OFDM} = \text{Re} \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} w(t - kT) \sum_{i=-N_{FFT}/2}^{N_{FFT}/2-1} X_{i,k} \cdot e^{j2\pi \frac{i}{T_{FFT}}(t-kT)} e^{j2\pi f_{RF}t} \right\}, \quad (3.19)$$

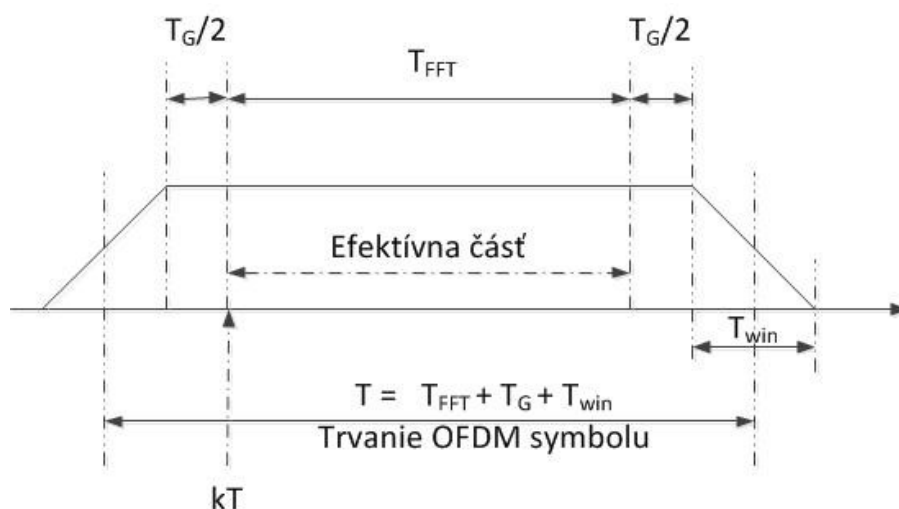
je definované pre: $kT - T_G/2 - T_{win} \leq t \leq kT + T_{FFT} + T_G/2 + T_{win}$.

V predchádzajúcom výraze $X_{i,k}$ označuje k-ty OFDM symbol v i-tej subnosnej frekvencii, $w(t)$ je funkcia okna a f_{RF} je RF nosná frekvencia. Doba trvania OFDM symbolu je označená ako T, vzhľadom k tomu T_{FFT} je postupnosť FFT trvania, T_G je strážny interval trvania (doba trvania cyklického predĺženia), a T_{win} je dĺžka oknového intervalu. Podrobnosti o OFDM symbole sú uvedené na obrázkoch 3.10 a 3.11. Tieto symboly sú tvorené nasledujúcim spôsobom: N_{QAM} (= k) po sebe

idúce vstupné QAM symboly sú „zero-padded“ získame N_{FFT} ($=2^m$, $m > 1$) vstupné vzorky pre inverzný FFT, potom z N_G vzoriek je vytvorený ochranný interval T_G a konečne je symbol OFDM vynásobený funkciou okna.



Obrázok 3.10: FSO - OFDM systém: Cyklické predĺženie OFDM symbolu.



Obrázok 3.11: FSO - OFDM systém: OFDM symbol po okne (windowing).

Účelom cyklického predĺženia je zachovať ortogonalitu medzi subnosnými vlnami, keď susedné OFDM symboly sa prekrývajú a účelom Okna (windowing) je znížiť „out-of-band“ (mimo pásmo) spektrum. Cyklické predĺženie je znázornené na Obrázku 3.10. Toto je vykonávané opakovaním posledných $N_G/2$ vzoriek z FFT rámu ako prefix a opakovaním prvých $N_G/2$ vzoriek. Potom po D/A konverzii a RF konverzii, prevedieme RF signál do optickej oblasti pomocou jednej z dvoch možností:

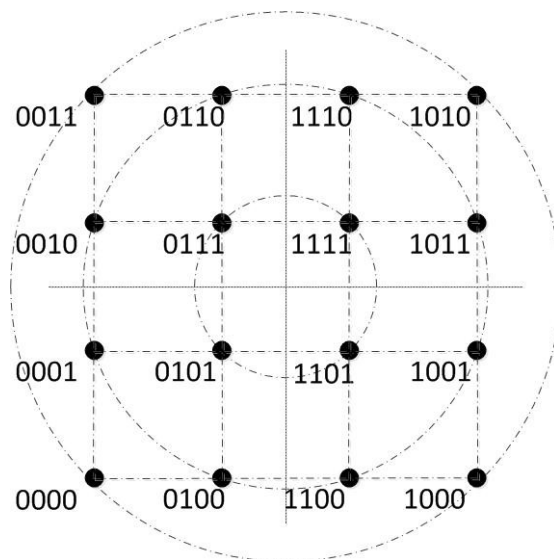
1. Pri prenosovej rýchlosti do 10 Gbit/s signál OFDM priamo moduluje DFB laser.
2. Pri prenosovej rýchlosti väčšej ako 10 Gbit/s signál OFDM riadi Mach-Zehnder modulátor (MZM).

FSO systém bod – bod je znázornený na obrázku 3.9c. Skladá sa z FSO-OFDM vysielača, média v ktorom sa šíri a s FSO-OFDM prijímača. Modulovaný lúč sa premieta smerom k prijímaču pomocou rozširujúceho ďalekohľadu. Na prijímači optický systém zhromažďuje svetlo a zameriava ho na detektor, ktorý prináša elektrický signál úmerný vstupnej optickej mohutnosti. PIN fotodióda a predzosilňovač alebo lavínová fotodióda sa zvyčajne používa ako optický detektor. Počas šírenia vzduchom optické lúče majú rôzne amplitúdové a fázové variácie čo je spôsobené rozptylom. Lom je spôsobený vplyvom turbulencií v atmosfére a absorpciou. Nakoniec po A/D prevode a odstránení cyklického predĺženia je prenosový signál demodulovaný pomocou FFT algoritmu. [2]

4 QAM (Qadrature amplitude modulation)

4.1 Princíp QAM modulácie

Ide o zloženú moduláciu, ktorá k vytvoreniu symbolov využíva kombináciu (ASK) amplitúdového a (PSK) fázového kľúčovania. Každý stav je reprezentovaný určitou hodnotou amplitúdy a fázy, ako je zobrazené na obrázku 4.1 v konštalačnom diagrame. Je to vlastne viacstavová modulácia, ktorá je schopná prenášať n bytov pomocou m symbolov, z toho vyplýva, že za jeden okamžik prenesie viac bitov naraz. [3]



Obrázok 4.1: Konštalačný diagram 16 – QAM.

Vzťah medzi stavmi a symbolmi je definovaný nasledovne:

$$n = \log_2 m. \quad (4.1)$$

Na prenos jedného bitu sú potrebné dva stavy: buď je to log 0 alebo log 1. Ak chceme preniesť viac bitov v jednom symbole, potrebujeme viac stavov. Napr. ak chceme preniesť 4 bity, budeme potrebovať $2^4 = 16$ stavov (16-QAM). Platí vzorec, že na n bitov je potreba m modulačných stavov, podľa vzorca:

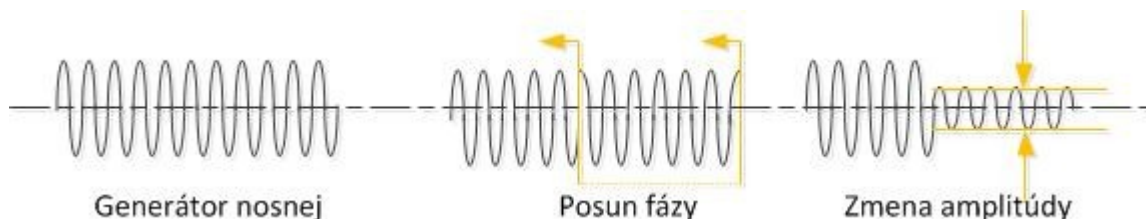
$$m = 2^n. \quad (4.2)$$

Každý symbol je zložený z niekoľko periód nosného harmonického signálu a je určený dvoma parametrami: amplitúdou a fázou. [3][6] Tieto symboly sú vysielané vo forme signálových prvkov $s_1(t), s_2(t), \dots, s_m(t)$, ktoré majú dobu trvania tj. symbolovú periódu T_s a sú vyjadrené obecným vzťahom:

$$s_{QAM} = \sqrt{\frac{2E_{min}}{T_s}} a_i \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{\frac{2E_{min}}{T_s}} b_i \sin(2\pi f_c t); 0 \leq t \leq T_s, i = 1, 2, \dots, m. \quad (4.3)$$

Kde a_i, b_i sú páry nezávislých celých čísel, odpovedajúcich polohe jednotlivých bodov konštalačného diagramu a E_{min} je stredná energia signálového prvku s najmenšou amplitúdou. [5]

Na obrázku 4.2 je zjednodušene znázornená kombinácia obidvoch metód kľúčovania.



Obrázok 4.2: Vytvorenie symbolu QAM.

Kvadratická amplitúdová modulácia je využívaná hlavne pre prenos dát s úzkym prenosovým spektrom. [3]

4.2 Modulátory QAM

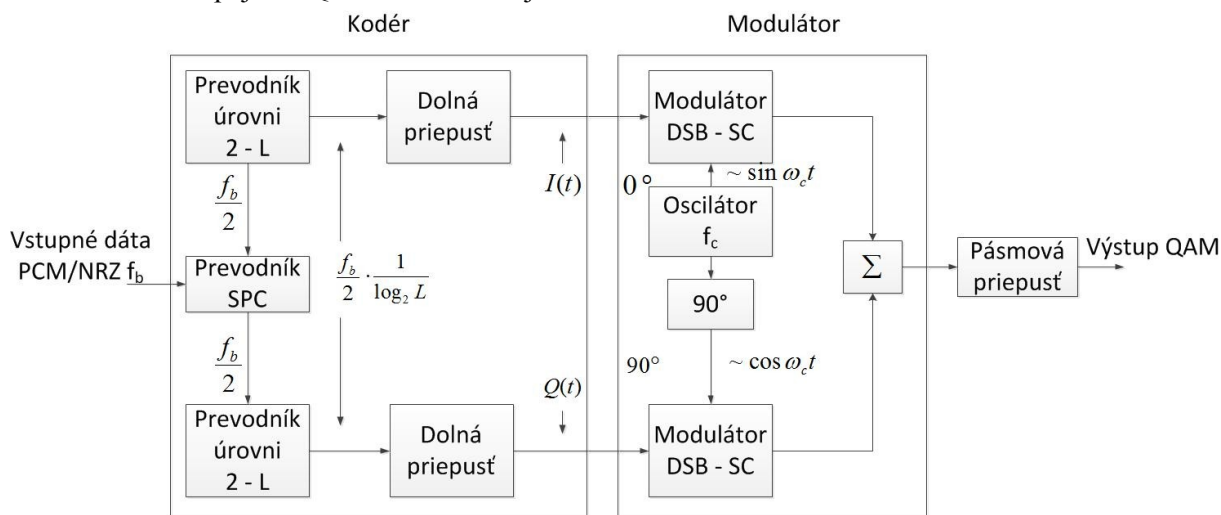
Modulácia QAM ide modulovať pomocou kvadratúrnych modulátorov označovaných tiež ako vektorové IQ modulátory. Tieto modulátory bývajú koncipované ako univerzálne modulačné jednotky, ktoré ide vhodným naprogramovaním kóderu adaptovať na ľubovoľný počet stavov modulácie QAM. Činnosť kvadratúrnych diskretných modulátorov je založená na skutočnosti, že ľubovoľný signál o konštantnej uhlovej frekvencii ω_c a o ľubovoľnej časovej premennej fáze $\phi_c(t)$ a o ľubovoľnej časovej premennej amplitúde $U_c(t)$ ide vyjadriť v obvyklom tvare:

$$u(t) = U_c(t) \sin[\omega_c t + \phi_c(t)]. \quad (4.4)$$

Ten istý signál je však možné zložiť tiež z dvoch zložiek, s rovnakými frekvenciami, avšak s konštantnou vzájomnou fázou 90° a s amplitúdami $I(t)$, $Q(t)$, potom vzorec bude vyzeráť takto:

$$u(t) = I(t) \sin(\omega_c t) + Q(t) \cos(\omega_c t). \quad (4.5)$$

Názorné zapojenie QAM modulátoru je uvedené na obrázku 4.3.



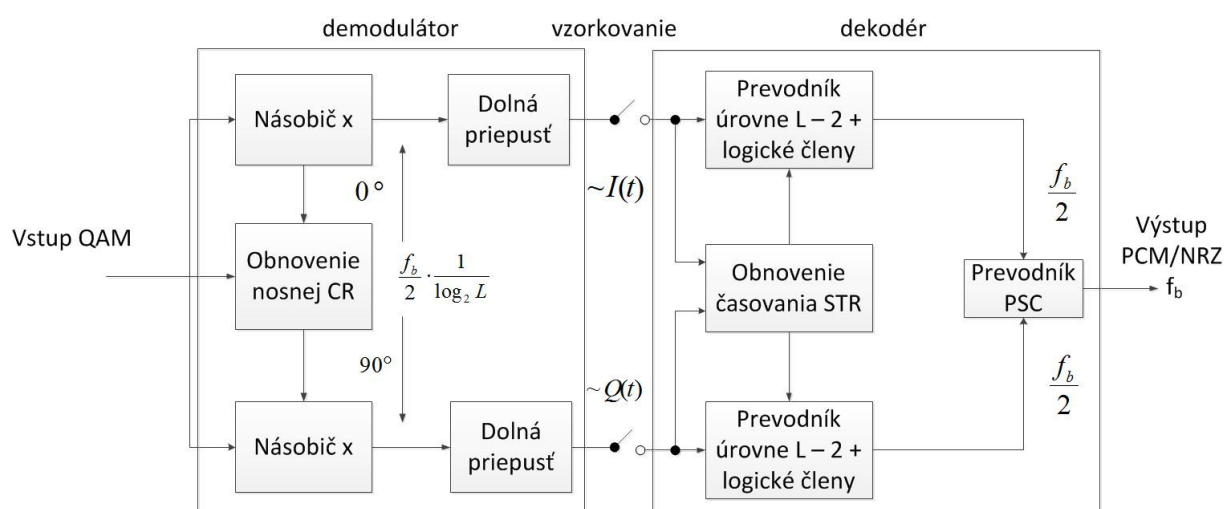
Obrázok 4.3: Univerzálny kvadratúrny modulátor

Na vstup prichádza modulačný signál. Ten ide ďalej do kóderu. Kóder z neho vytvorí $I(t)$, $Q(t)$ zložky, potrebné pre nasledujúci kvadratúrny modulátor. Kóder sa skladá zo sériového paralelného prevodníka SPC, ktorý delí vstupný bitový tok o rýchlosti f_b na dva binárne toky $f_b/2$. V prevodníkoch úrovne sa z nich vytvoria kvantované signály o L – úrovniach a symbolových rýchlostiach

$f_m = (f_b/2)(1/\log_2 L)$. Tieto signály sa ďalej filtrujú v dolných priepustiach. Potom prichádzajú ako modulačné signály $I(t)$, $Q(t)$ na násobiče (modulátory DSB-SC). V nich sa realizuje operácia vyjadrená vzťahom (4.5), teda násobenie a ich následne sčítanie kvadrátúrnych vln. Výstupný signál je ešte filtrovaný medzifrekvenčnou pásmovou priepusťou. [5]

4.3 Demodulátory QAM

Signály QAM sa dajú demodulovať pomocou kvadrátúrnych demodulátorov. Vlastne sú len opakom modulátorov. Príklad demodulátora je znázornený na obrázku 4.4



Obrázok 4.4: Univerzálny kvadrátúrny demodulátor

Signál privedený na vstup sa delí do dvoch rovnakých zložiek, a tie prichádzajú na jeden vstup analógových násobičov, pôsobiacich ako súčinové detektory. Tieto zložky ide vyjadriť vzťahom (4.5). Na druhý vstup násobiča prichádza synfázová resp. kvadrturná obnovovacia nosná vlna. Za nasledujúcou dolnou priepusťou, ktorá potlačuje druhé harmonické nosné vlny $2\omega_c$, už dostaneme demodulovanú synfázovú zložku $I(t)/2$. Súčasne za dolnou priepusťou kvadrátúrnej vetvy sa objavuje kvadrturná zložka $Q(t)/2$. Obidve zložky sa následne vzorkujú a postupujú do dekodéru, kde sa najskôr v prevodníkoch úrovne $L-2$ premení na binárne signály. Každý z obidvoch prevodníkov obsahuje $(L-1)$ napäťových komparátorov, ktoré umožňujú rozširovať L úrovni zložiek $I(t)$, $Q(t)$. Určitý komparátor poskytuje na svojom výstupe stav logickú 1, ak presahuje v okamihu vzorkovania vstupný signál jeho prahové napätie v opačnom prípade poskytuje na výstupe stav logická 0. Všetky $L-1$ binárnych výstupov napäťových komparátorov vchádza paralelne do logických obvodov, kde sa prevádzajú na sériové bitové toky o rýchlosti $f_b/2$. A z nich sa konečne na výstupnom kombinačnom obvode vytvára výstupný signál PCM. [5]

4.4 Výhody a nevýhody QAM modulácie

Každá modulácia si prináša veľa výhod ale aj nevýhod. Hlavnou výhodou QAM modulácie je, že umožňuje šetriť šírku pásma alebo naopak, že s rovnakou šírkou pásma dokáže zvýšiť prenosovú rýchlosť. QAM modulácia má aj nevýhodu a to v tom, že pri použití viac stavov sa signál stáva náchylnejším na rušenie a zložitejší na identifikáciu symbolu. Preto sú kladené vyššie požiadavky na kvalitu vysielaného a prijímaného signálu. [3]

4.5 Rozdelenie QAM modulácie

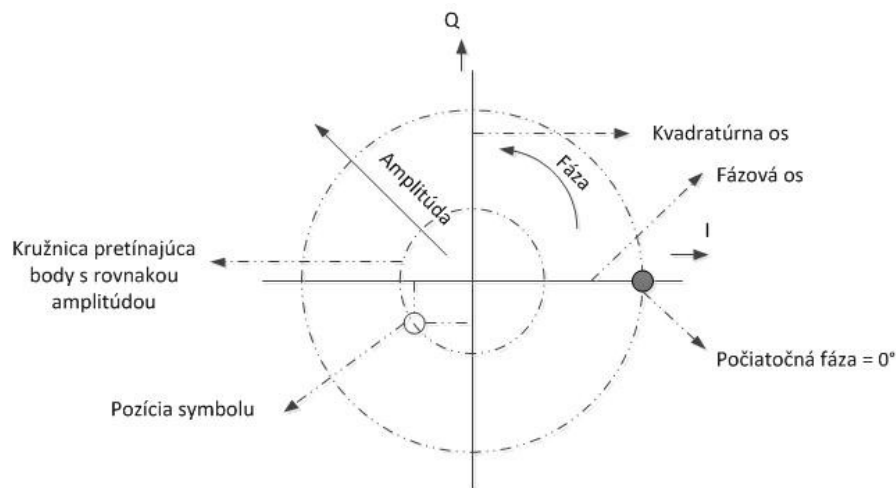
QAM moduláciu môžeme podľa stavov rozdeliť na 5 najpoužívanejších typov modulácií a to:

- **4QAM** – počet stavov 4, počet bitov na stav 2.
- **16QAM** – počet stavov 16, počet bitov na stav 4.
- **32QAM** – počet stavov 32, počet bitov na stav 5.
- **128QAM** – počet stavov 128, počet bitov na stav 7.
- **256QAM** – počet stavov 256, počet bitov na stav 8.

Najčastejšie sa zobrazujú pomocou konštalačných diagramov [3].

4.6 Konštalačné diagramy

Konštalačnými diagramami sa dá prehľadne zobrazit' súvislosť bitovej kombinácie a príslušného symbolu k tejto kombinácii. Pre čo najväčšiu elimináciu chýb je výhodné umiestniť susedné bitové kombinácie tak, aby boli rozdielne iba v jednom bite. Pri chybnom prijatí dôjde k zámene, najpravdepodobnejšie zo susedným symbolom. Chyba potom nastane minimálna a detekčným alebo samo opravným kódom ju ide jednoducho odhaliť, prípadne opraviť. Na obrázku 4.3 je zobrazená orientácia v týchto diagramoch. [4]



Obrázok 4.5: Orientácia v konštalačnom diagrame.

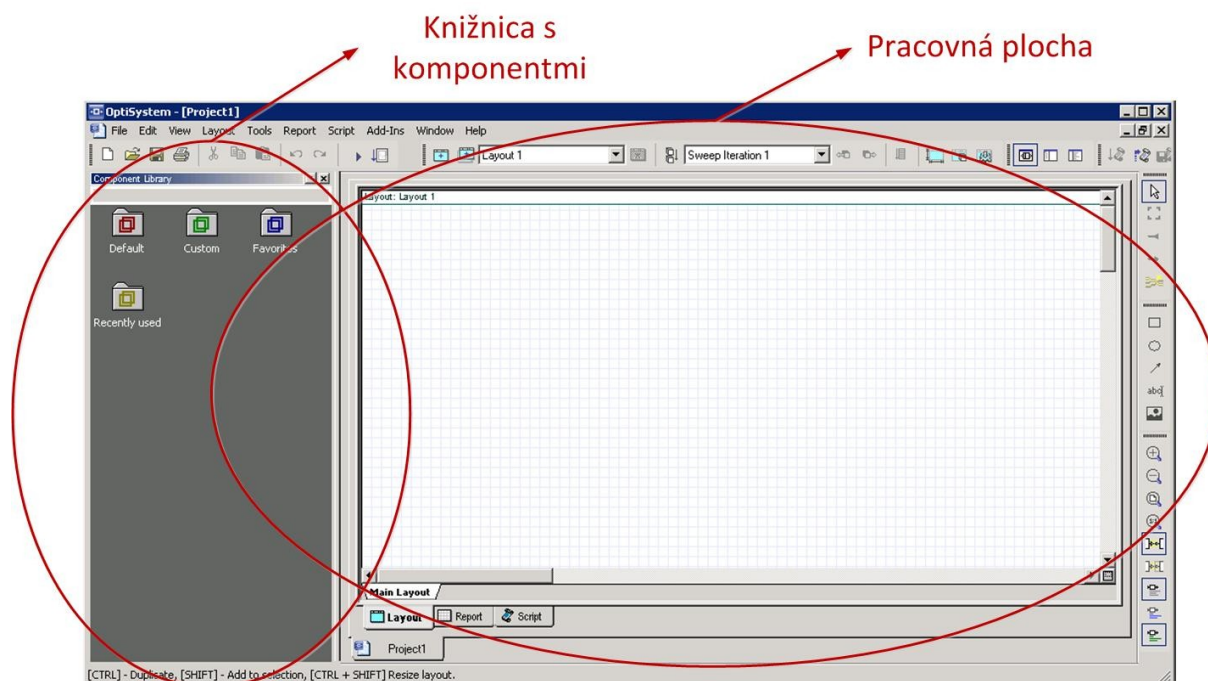
5 Popis softvéru OptiSystem 11.0 od firmy Optiwave

5.1 OptiSystem 11.0

OptiSystem je softvér, ktorý umožňuje užívateľom plánovať, testovať, simulovať optické spoje a prenosové systémy v moderných optických sieťach.

5.2 Uživatelské rozhranie

Užívateľské rozhranie je veľmi prehľadné. V hornej časti sa nachádza menu, ktoré obsahuje možnosti ako sú: súbor, upraviť, náhľad. Pod týmito možnosťami je umiestnený panel s rýchlymi ikonami. Na ľavej strane sa nachádza knižnica s jednotlivými komponentmi. Táto knižnica je rozdelená do jednotlivých zložiek, ako sú napríklad obľúbene, najpoužívannejšie alebo základné zložky. Napríklad v základnej zložke kde sa nachádzajú všetky komponenty je knižnica s modulátormi, demodulátormi, komponentmi pre vysielač a prijímač. V strede je umiestnená pracovná plocha, ktorá má mriežkovú štruktúru. Na ňu si vyberáme jednotlivé komponenty z knižnice a zostrojujeme schému. Spájanie komponentov prebieha buď ručne, alebo si môžeme nastaviť automatické spájanie. Po vytvorení schémy spustíme simuláciu tlačidlom play.



Obrázok 5.1: Pracovné prostredie programu OptiSystem.

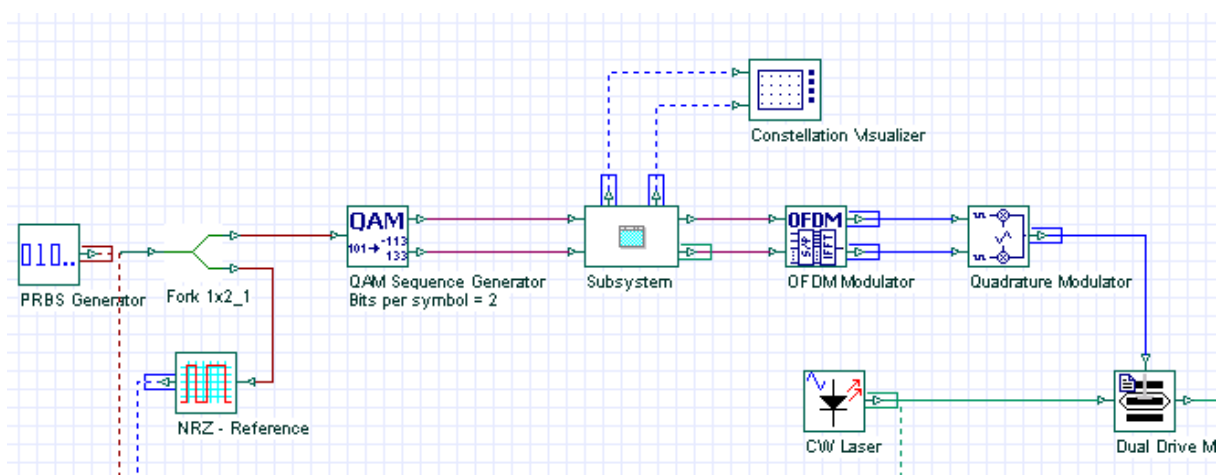
6 Simulácie v programe OptiSystem

Mojou úlohou bolo nasimulovať dva typy modulácií a to moduláciu OFDM a 16 – QAM. Zapojenie jednotlivých modulácií som realizoval v programe OptiSystem 11.0. Preto aby som mohol simulovať modulácie pre bezvláknový optický spoj som musel nasimulovať prostredie, ktoré by predstavovalo hmlu. Preto som použil FSO komponent, ktorý sa nachádza v programe. Dokáže simulovať rôzne atmosférické javy podľa nastavených hodnôt. Jednotlivé nastavenia, popis ku schémam a výsledkom zo simulovania je uvedený v ďalších kapitolách a podkapitolách.

6.1 Modulácia OFDM

6.1.1 Vysielač

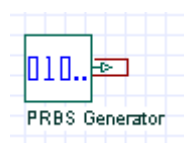
Na obrázku 6.1 vidíme konkrétne zapojenie vysielača v programe OptiSystem. Červené spojky nám znázorňujú bitovú časť, modré elektrickú a zelené optickú časť.



Obrázok 6.1: Vysielacia časť prenosového systému.

V zapojení som použil nasledujúce prvky:

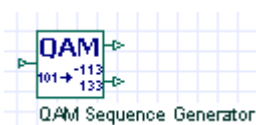
Náhodný generátor bitovej sekvencie



Obrázok 6.2: Generátor bitovej sekvencie.

Generuje náhodnú sekvenciu bitov podľa rôznych prevádzkových režimov. Dajú sa na ňom nastaviť rôzne parametre ako je napríklad prenosová rýchlosť alebo operačný mód.

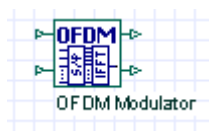
QAM sekvenčný generátor



Obrázok 6.3: QAM sekvenčný generátor.

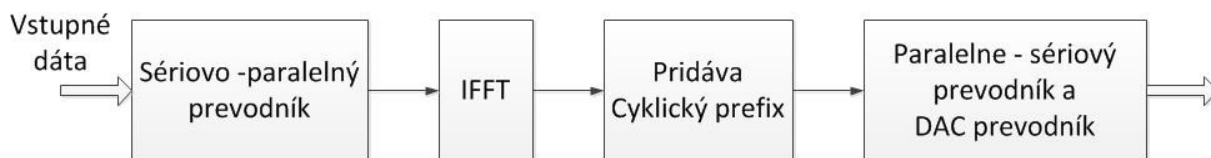
Generuje dva paralelné M-ary elektrické signály z binárnych signálov s využitím kvadráturnej amplitúdovej modulácie (QAM). Bitovú postupnosť rozdeľuje do dvoch paralelných podpostupností. Vykonáva sa to pomocou seriovo-paralelného prevodníka. Pri prenášaní informácií sa môže meniť amplitúda signálu v závislosti na predvolených symboloch. Na tomto generátore si môžeme nastaviť počet bitov na symbol, pracovný cyklus (je to doba trvania vysokej úrovne), Gray code.

OFDM modulátor



Obrázok 6.4: OFDM modulátor.

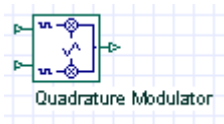
OFDM modulátor moduluje prijatý signál do niekoľkých ortogonálnych subnosných vln. Na obrázku 6.2 vidíme blokovú schému modulátora.



Obrázok 6.5: Bloková schéma modulátora.

Dáta na vstupe môžu byť modulované rôznymi typmi modulácií, napríklad: QAM, BPSK. Vstup je prekonvertovaný do paralelného formátu. Po mapovaní, inverzná Fourierová transformácia nájde odpovedajúcu časovú krivku. Následne je pridaný cyklický prefix. Potom sú dáta prekonvertované do sériového formátu. Na OFDM modulátore si môžeme nastaviť rôzne parametre ako napríklad: počet vstupných portov, počet subnosných vln, počet bodov IFFT, cyklický prefix.

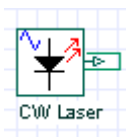
Kvadratúrny modulátor



Obrázok 6.6: Kvadratúrny modulátor.

Implementuje Kvadratúrnú amplitúdovú moduláciu. Môžeme na ňom nastaviť frekvenciu, fázu, zosilnenie.

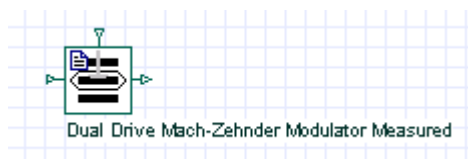
CW laser



Obrázok 6.7: CW laser.

Generuje optický signál. Nastavuje sa tu vlnová dĺžka, úroveň vysielacieho výkonu a mnoho ďalších parametrov.

Mach – Zehnder modulátor



Obrázok 6.8: Mach – Zehnder modulátor.

Mach – Zehnder modulátor ovplyvňuje vysielací svetelný lúč s CW lasera prijatým signálom z OFDM modulátora. Následne je svetlo vysielané do prenosového média.

6.1.2 Prenosové médium

Ako prenosové médium bola použitá súčiastka FSO kanál, ktorá nám simuluje atmosféru, konkrétne hmlu.

FSO kanál



Obrázok 6.9: FSO kanál.

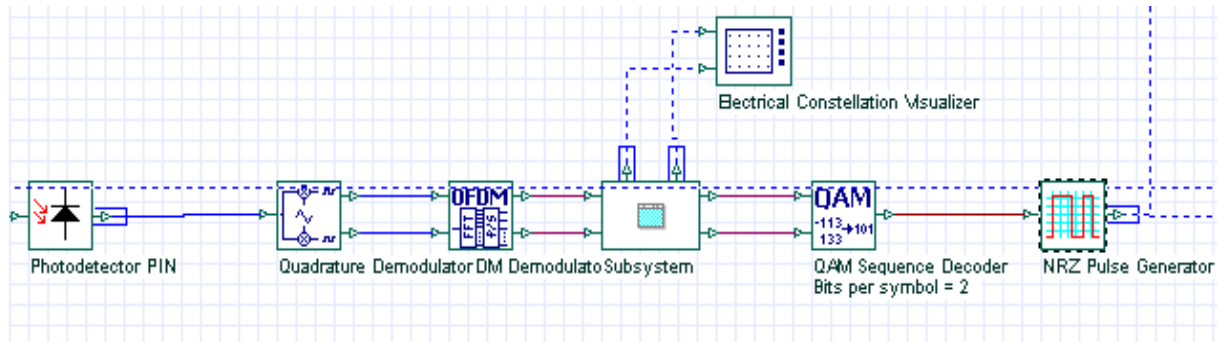
Pri simulácii hmly som použil tabuľku jednotlivých útlmov hmly. Táto tabuľka je vytvorená na základe Kim modelu, ktorý vytvoril Isaac I. Kim.

Tabuľka.6.1: Atmosférické deje	Jednotlivé útlmy hmly	
	Viditeľnosť v km	Útlm dB.km^{-1}
Hustá hmla	0,05	315
Stredná hmla	0,2 – 0,5	75,3 – 28,9
Slabá hmla	1 - 2	14 – 6,6
Opar	2 - 4	6,6 - 3
Čistá obloha	10 - 23	1 -0,6

Na FSO kanály som následne nastavoval jednotlivé útlmy podľa tabuľky.

6.1.3 Prijímač

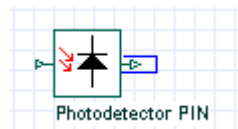
Obrázok 6.10 zobrazuje prijímaciu časť navrhnutú v OptiSystem.



Obrázok 6.10: OFDM prijímač.

V zapojení sú použité nasledujúce prvky:

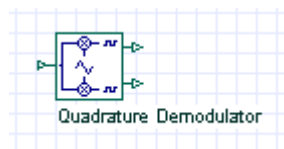
Fotodetektor PIN



Obrázok 6.11: Fotodetektor PIN.

Fotodetektor prevádza vstupný optický signál na elektrický signál.

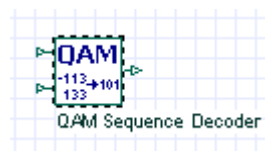
Kvadrátúry Demodulátor



Obrázok 6.12: Kvadrátúry demodulátor.

Implementuje kvadrátúry demodulátor použitím nosného generátoru pre Q a I kvadrátúry zložku. Môže sa na ňom nastaviť frekvencia, fáza, zosilnenie.

QAM sekvenčný dekodér



Obrázok 6.13: QAM sekvenčný dekodér.

Dekóduje dva paralelné QAM M-ary symbolové sekvencie na binárny signál.

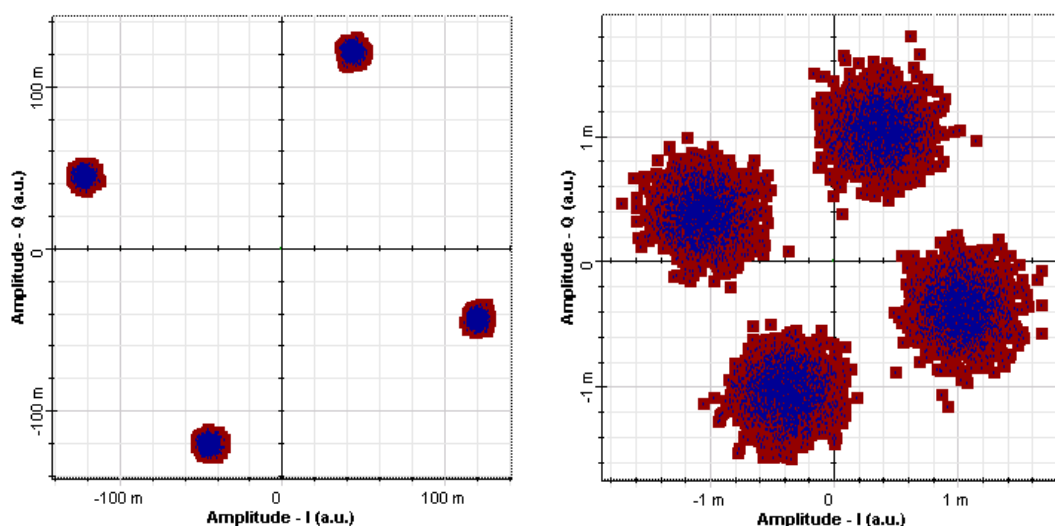
6.1.4 Namerané výsledky

Na OFDM modulátore som nastavil 512 subnosných vln. Na FSO kanály som nastavil priemer otvoru vysielačieho teleskopu na 5 cm, priemer otvoru prijímacieho teleskopu na 30 cm, vlnovú dĺžku na 1550 nm a útlm odpovedajúci hustote hmly a menil som vzdialenosť vysielača od prijímača

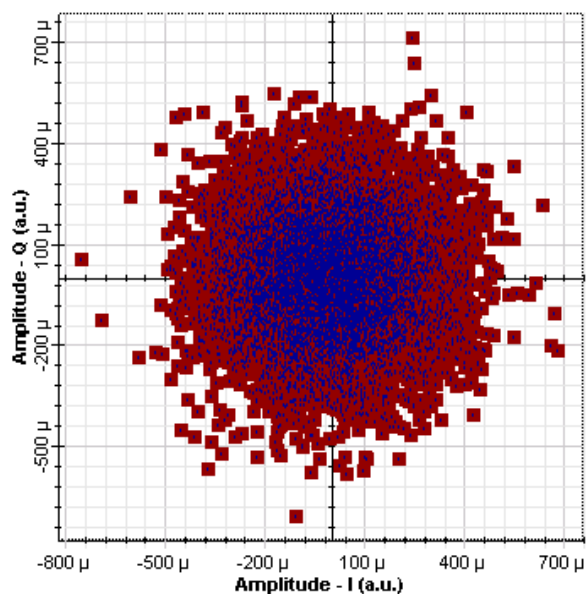
v rozsahu 50 m až 2 km. Merania som opakovane pre úroveň výkonu nastaveného na CW lasery 5, 10, 15, 30 a 40 dBm. Konštalačné diagramy som uviedol iba pre úroveň výkonu 5 dBm a 40 dBm, ostatné konštalačné diagramy sú uvedené v prílohe na CD.

Hustá hmla, viditeľnosť 50 m, útlm 315 dB.km^{-1}

Úroveň výkonu nastaveného na CW lasery 5 dBm



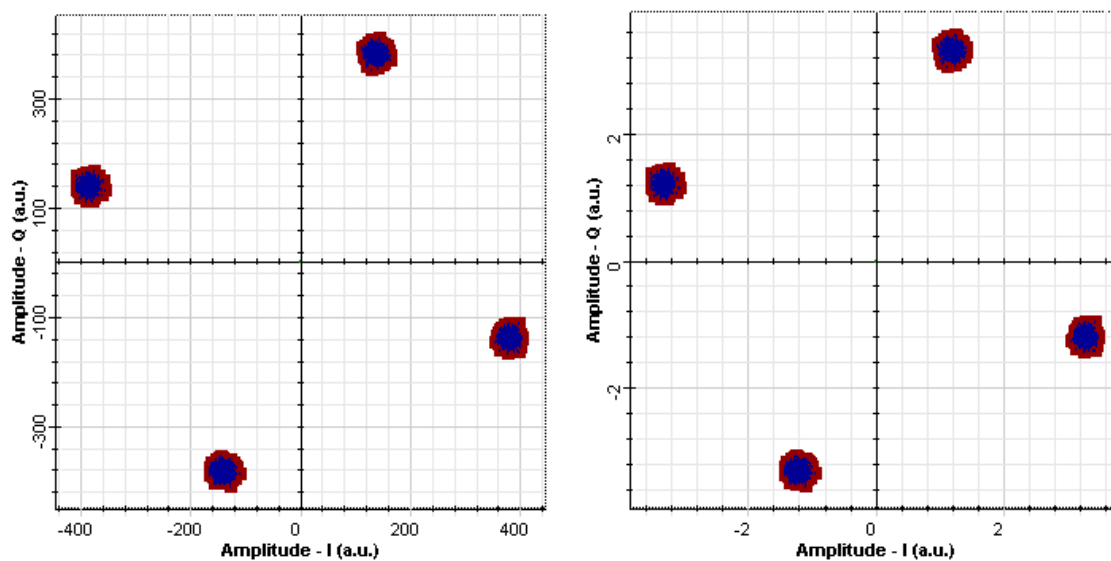
Obrázok 6.14: Konštalačné diagramy pri 50 m a 100 m.



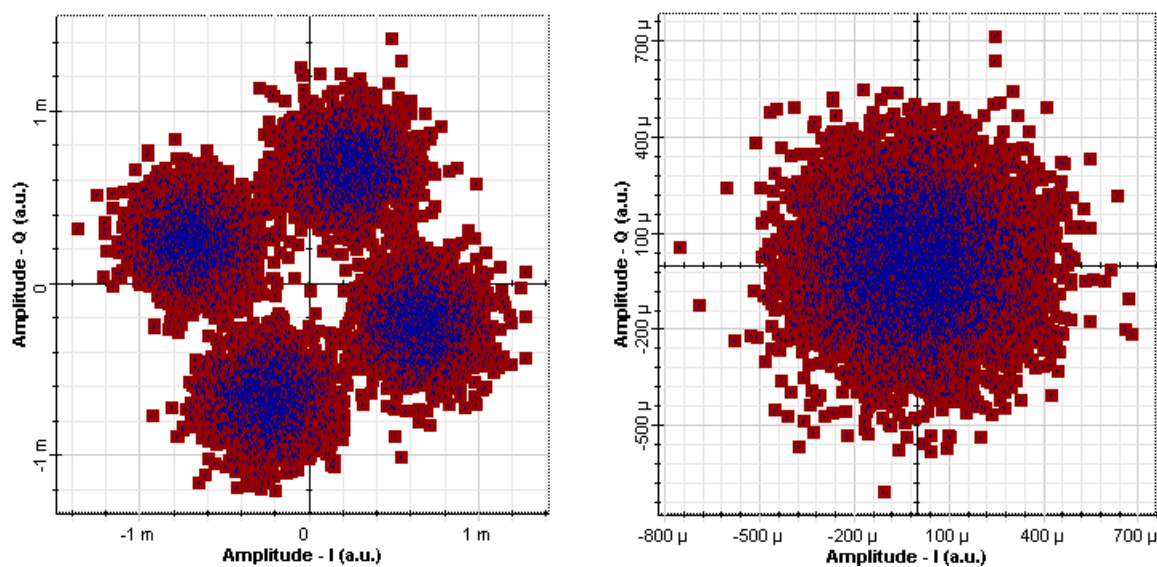
Obrázok 6.15: Konštalačný diagram pri 500 m.

Z konštalačných diagramov vidíme, že degradácia signálu nastáva už pri 100 m čo je spôsobené veľkým útlmom. Pri 500 m sa výkon 5 dBm už nedá použiť, pretože je veľmi slabý a prijímač ho už nezachytí.

Úroveň výkon 40dBm

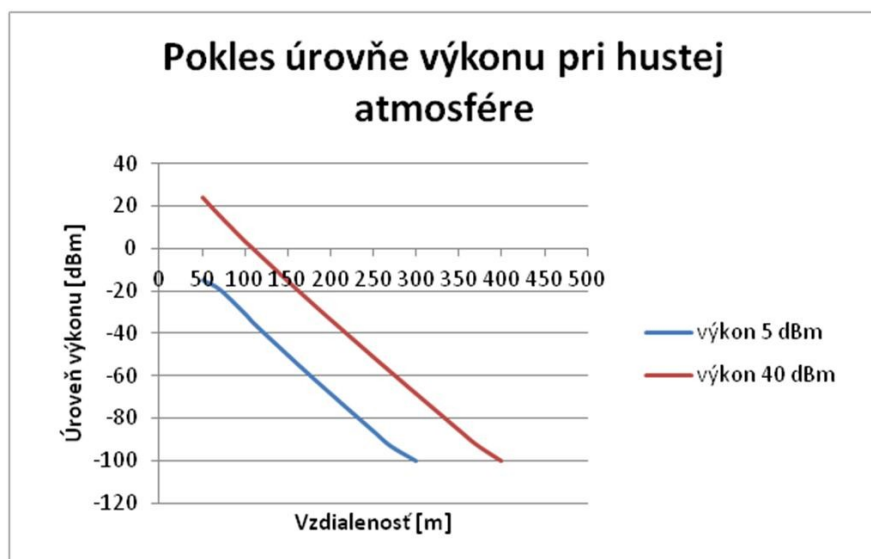


Obrázok 6.16: Konštalčné diagramy pre 50 m a 100 m.



Obrázok 6.17: Konštalčné diagramy pre 200 m a 500 m.

Pri úrovni výkonu 40 dBm sa signál začína zhoršovať až pri 200 m. Ani v jednom prípade sa signál nedostal za hranicu 500 m. Signál je už veľmi zašumený, nepoužiteľný na prenos informácie. Z toho vyplýva, že pri hustej hmle, kde je viditeľnosť maximálne 50 m je signál použiteľný do 100 až 150 m pri úrovni výkonu 40 dBm.

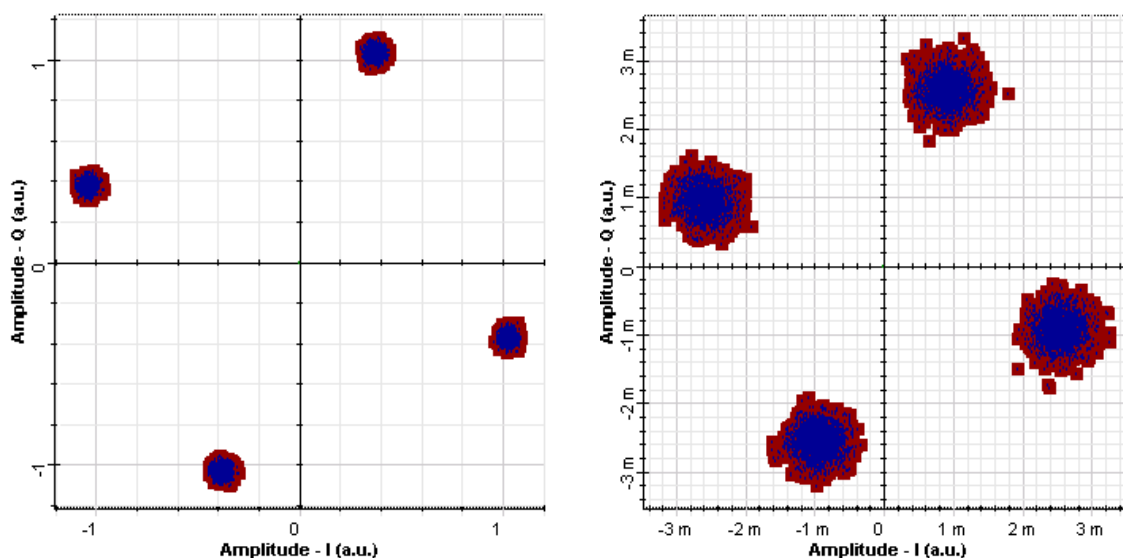


Obrázok 6.18: Graf utlmeného výkonu atmosférou.

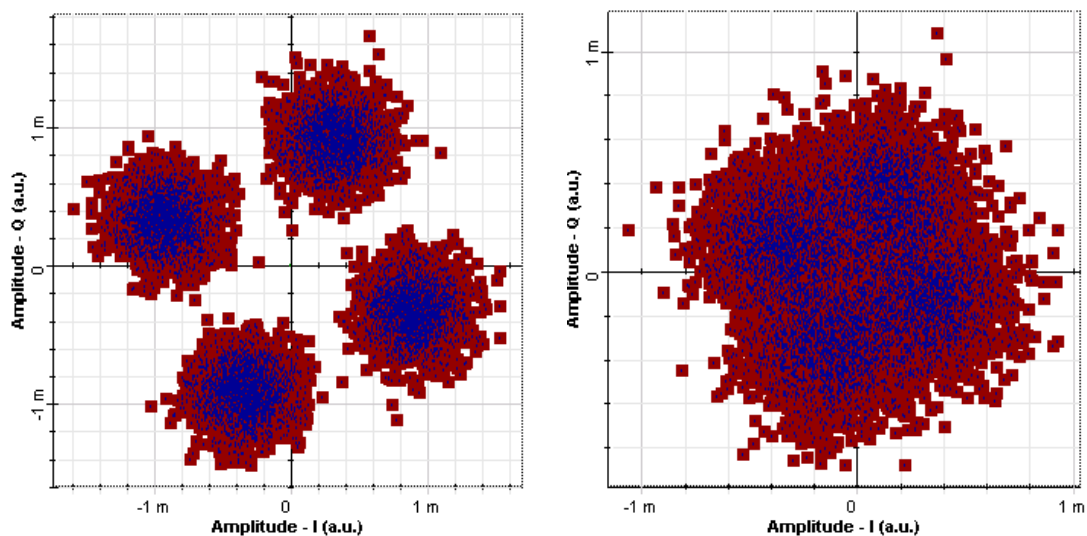
Z grafu vidíme, že úroveň výkonu po utlmení hmlou klesá skoro rovnomerne. Pri úrovni výkonu 40 dBm bola maximálna vzdialenosť, kde sa dal výkon ešte zmerať 400 m, na úrovni výkonu 5 dBm to bolo iba 300 m.

Stredná hmla, viditeľnosť 500 m, útlm $28,9 \text{ dB.km}^{-1}$

Úroveň výkonu 5 dBm



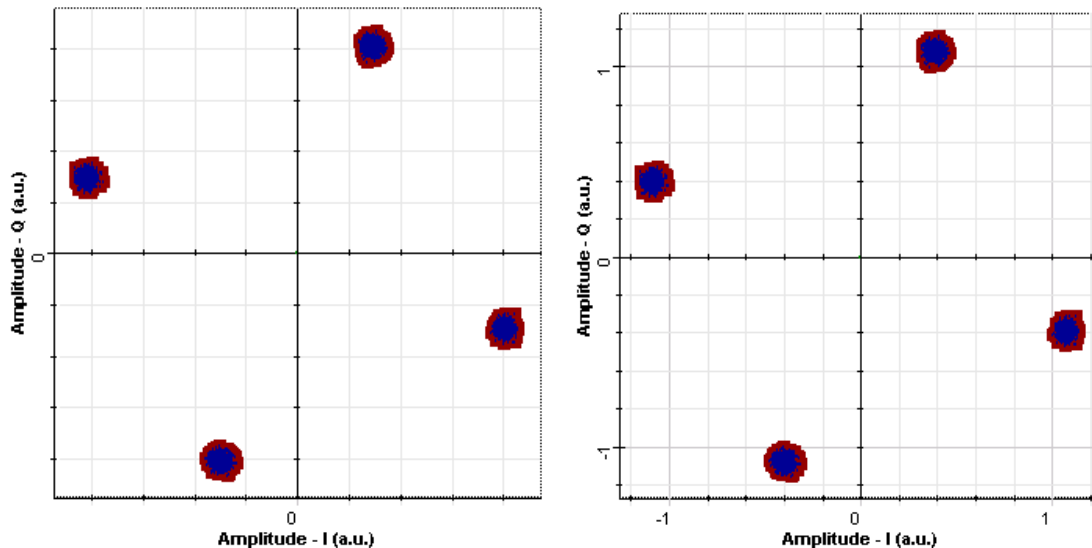
Obrázok 6.19: Konštalačné diagramy pre 100 m a 500 m.



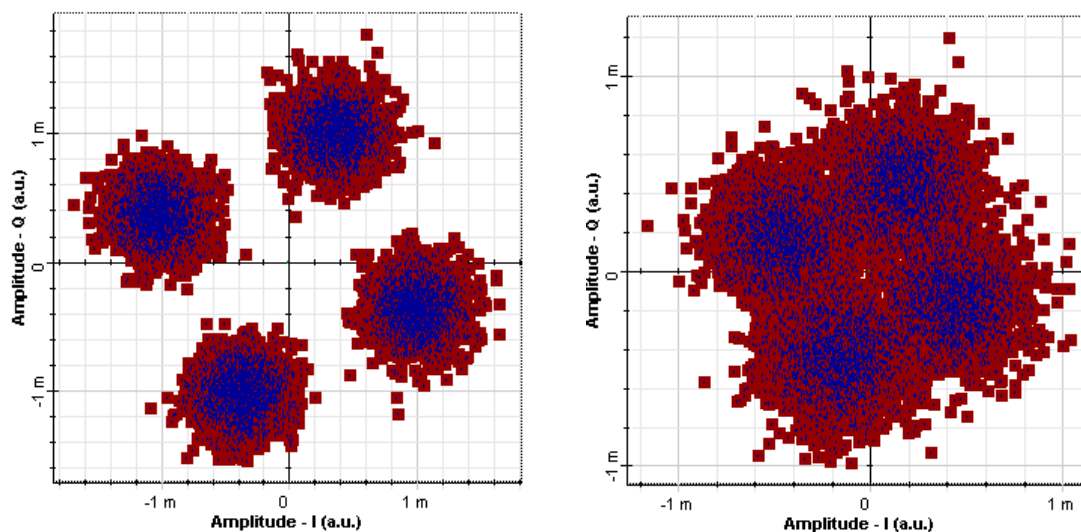
Obrázok 6.20: Konštalačné diagramy pre 600 m a 700 m.

Pri stredne silnej hmle nastáva degradácia signálu pri 500 m, do tejto vzdialenosti je signál použiteľný na prenos informácie a útlm spôsobený hmlou nie je taký silný ako za hranicou 500 m. Pri 700 m sa jednotlivé symboly spájajú do seba a signál sa stáva nepoužiteľným pre prenos informácie.

Úroveň výkonu 40 dBm

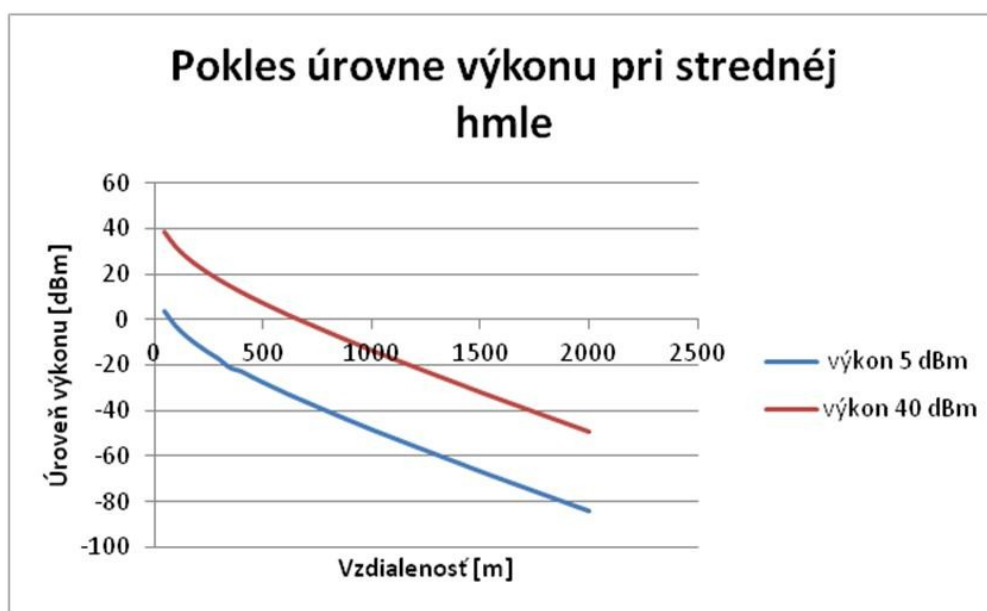


Obrázok 6.21: Konštalačné diagramy pre 500 m a 700m.



Obrázok 6.22: Konštalačné diagramy pre 1500 m a 1600m.

Pri nastavenej úrovni výkonu na CW lasery 40 dBm pochopiteľne signál bez degradácie dosiahol na väčšiu vzdialenosť. Ako môžeme vidieť z konštalačných diagramov, signál sa začína zhoršovať pri vzdialenosti 1500 m a pri 1600 m je už nepoužiteľný pre prenos informácie.

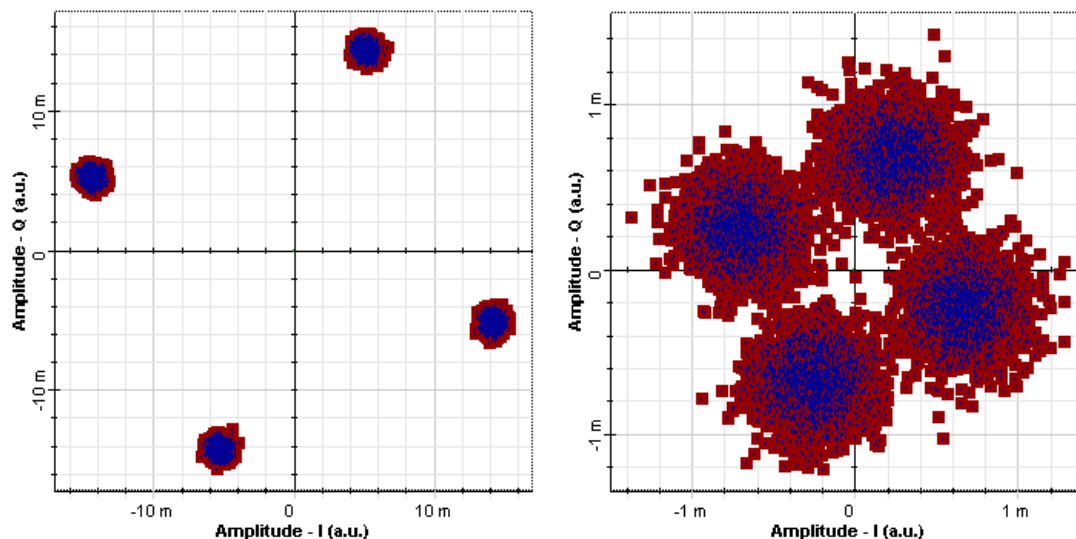


Obrázok 6.23: Graf utlmeného výkonu atmosférou.

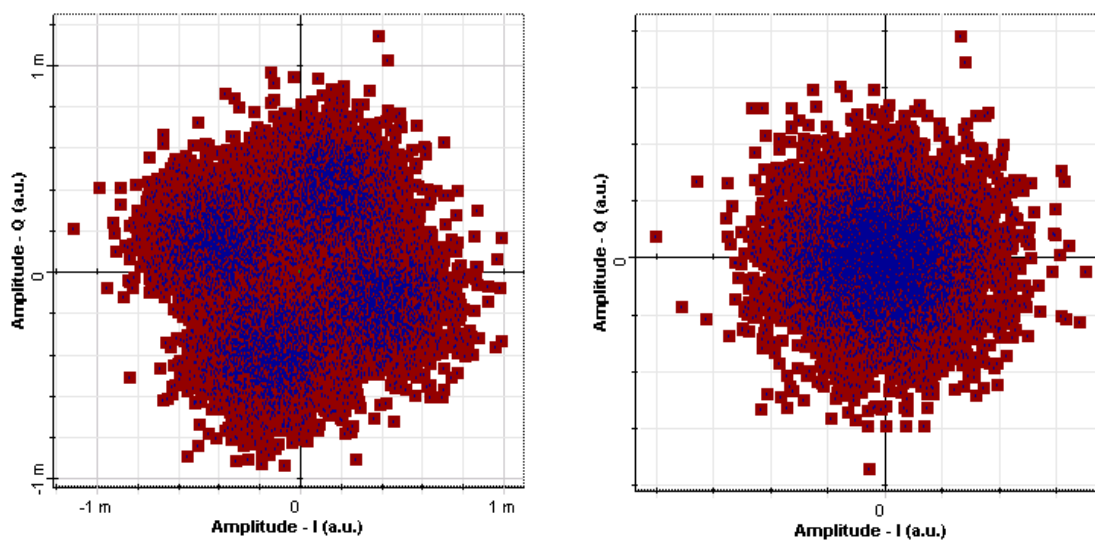
Na grafe vidíme, že úroveň výkonu pri 2000 m je už veľmi utlmená. To znamená, že signál už nie je použiteľný na prenos informácie.

Slabá hmľa, viditeľnosť 1000 m, útlm 14 dB.km^{-1}

Úroveň výkonu 5 dBm



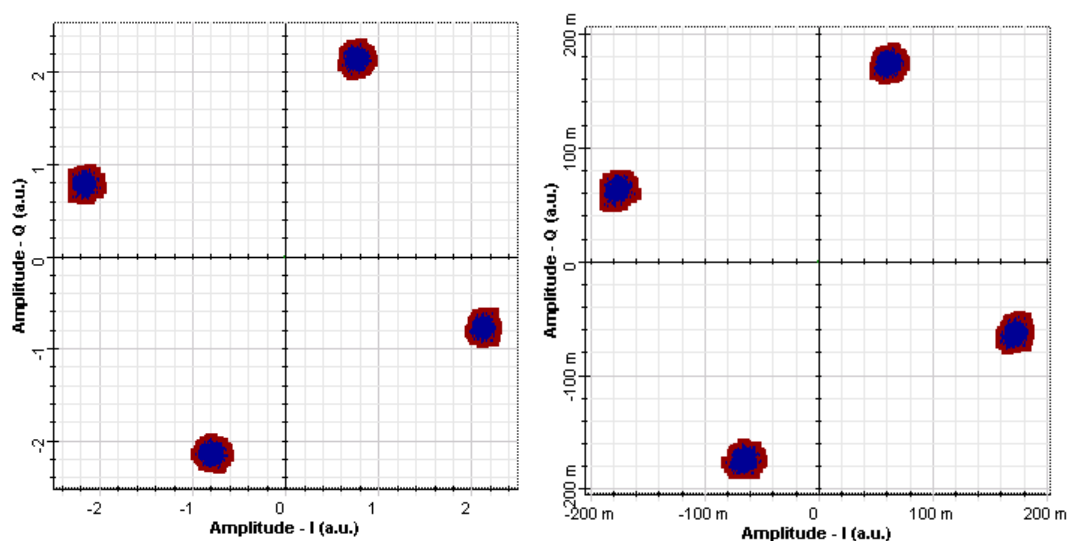
Obrázok 6.24: Konštalačné diagramy pre 500 m a 1000m.



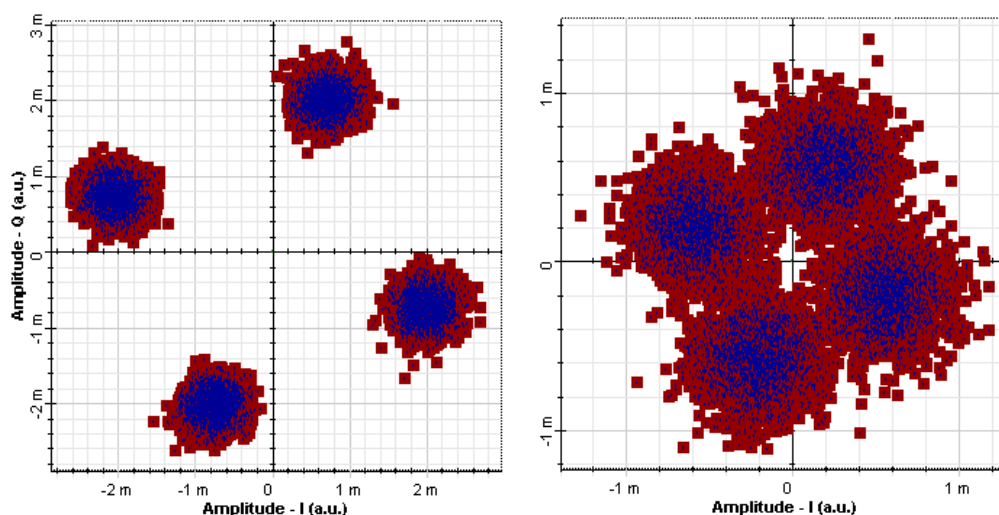
Obrázok 6.25: Konštalačné diagramy pre 1100 m a 1500m.

Pri slabej hmle s viditeľnosťou až do 1 km, pri útlme prostredia 14 dB.km^{-1} boli dosiahnuté najlepšie výsledky, čo sa týka vzdialenosti a použiteľnosti signálu. Ako vidíme na konštalačných diagramoch signál pri vzdialenosti 1000 m sa už degraduje, čo je spôsobené útlmom prostredia.

Úroveň výkonu 40 dBm

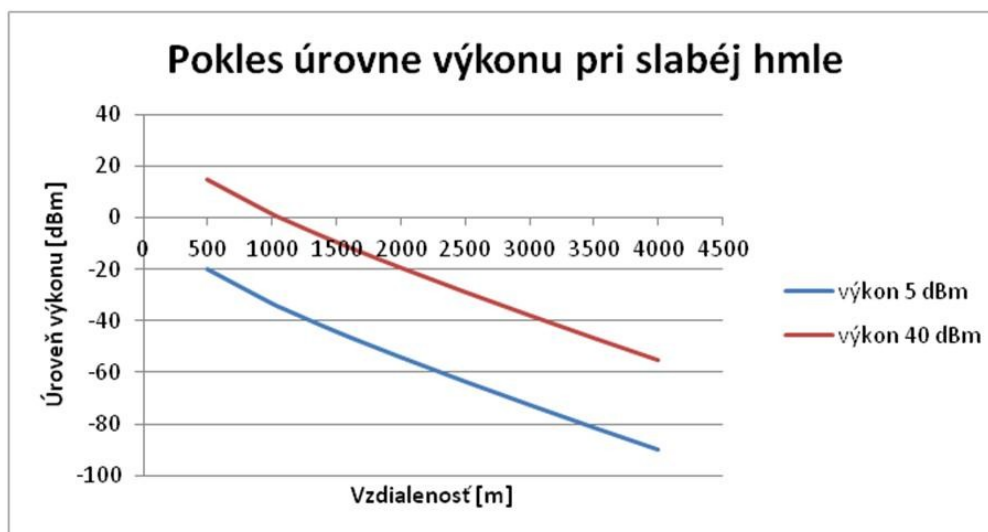


Obrázok 6.26: Konštalačné diagramy pre 1000 m a 1500m.



Obrázok 6.27: Konštalačné diagramy pre 2500 m a 2800 m.

Pri úrovni výkonu 40 dBm bol signál do 2000 m stále silný, potom sa už začal zhoršovať. Na vzdialenosti 2500 metrov je stále silný a použiteľný, ale už postupne nastáva degradácia signálu. Pri 2800 m sa signál už rapídne zhoršuje.

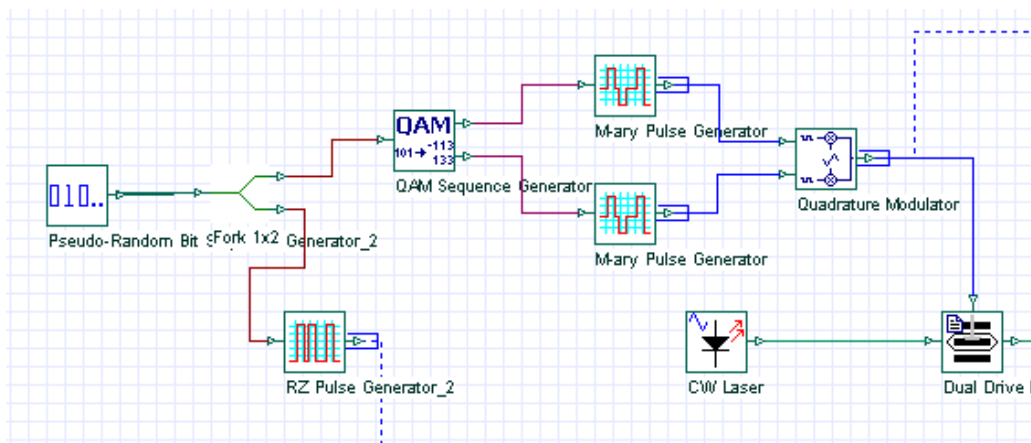


Obrázok 6.28: Graf utlmeného výkonu atmosférou

Pri slabej hmle vidíme, že úroveň výkonu sa podarilo namerať do veľkej vzdialenosti, ale už je nepoužiteľný na prenos informácie. Výkon, ktorý sa dá považovať za ešte použiteľný je zhruba -20 až -25 dBm.

6.2 Modulácia QAM

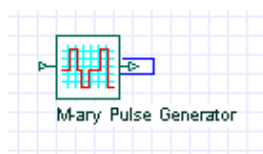
6.2.1 Vysielač



Obrázok 6.29: Vysielač pre QAM moduláciu.

V zapojení som použil množstvo rovnakých komponentov ako pri simulácii OFDM, preto som ich už opäť neopisoval. Ich popis môžete vidieť vyššie. Ďalej som použil nasledujúce prvky:

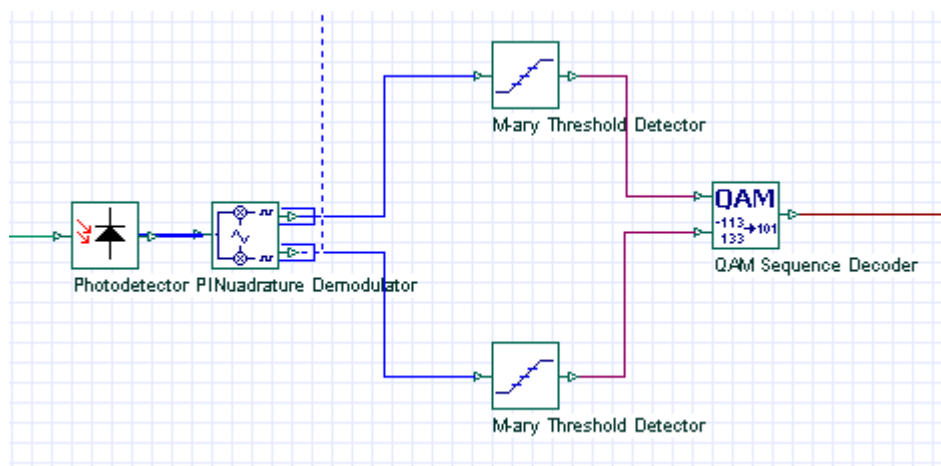
M-ary Pulzný Generátor



Obrázok 6.30: M-ary Pulzný Generátor.

Slúži na generovanie viacúrovňových impulzov v závislosti na M-ary vstupnom signále.

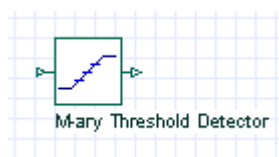
6.2.2 Prijímač



Obrázok 6.31: Prijímač pre QAM moduláciu.

Použité komponenty:

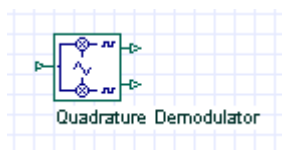
M-ary prahový detektor



Obrázok 6.32: M-ary prahový detektor.

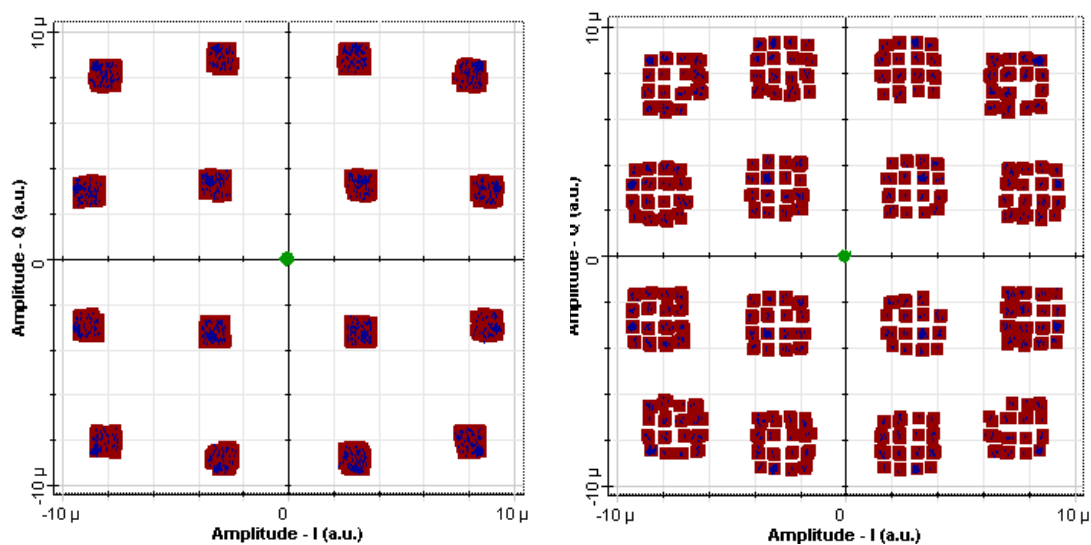
Dekóduje viacúrovňové impulzy M-ary vstupného signálu.

Kvadratúrny demodulátor



Obrázok 6.33: Kvadratúrny demodulátor.

Tento komponent je popísaný v OFDM modulácii. Chcem poukázať na rozdiel pri nastavení filtrovania medzného kmitočtu pri 13,5 MHz a pri 10 MHz.



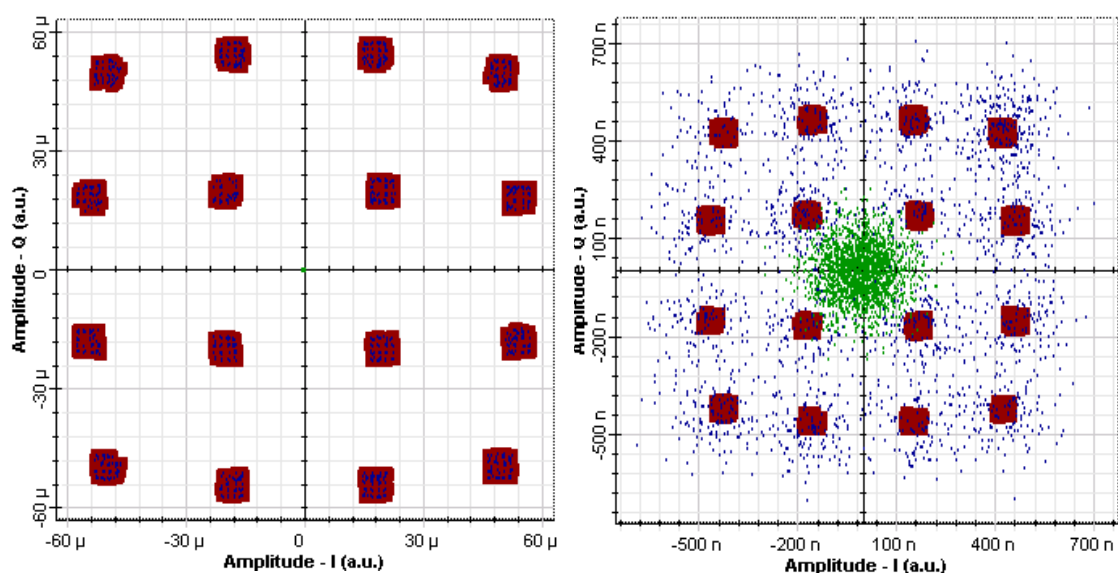
Obrázok 6.34: 16 – QAM pri 13,5 MHz a pri 10 MHz.

6.2.3 Namerané výsledky

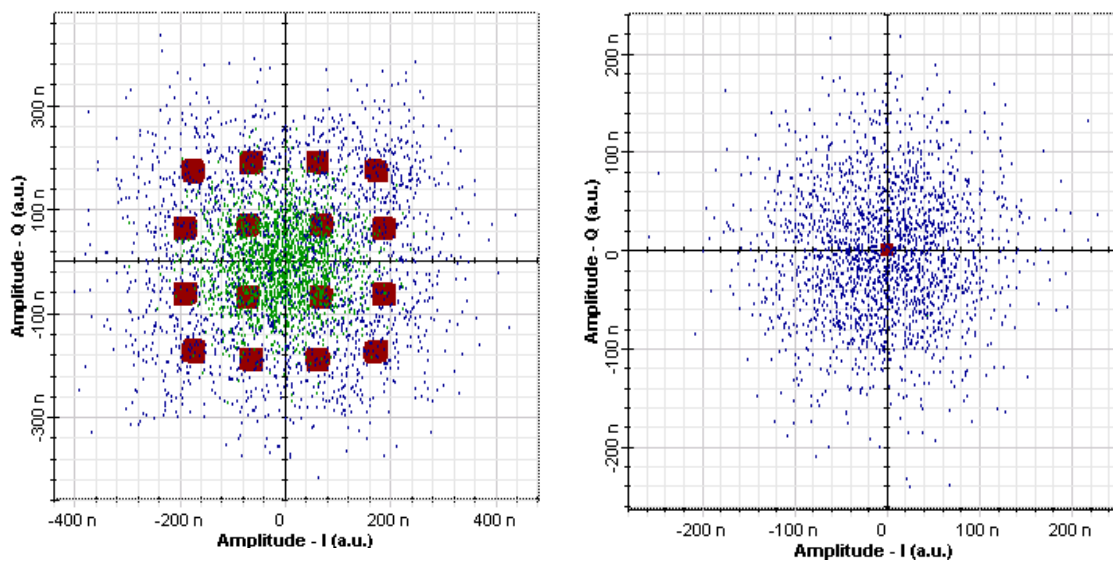
Pri meraní som použil moduláciu 16 – QAM. Merania som opakoval pre úroveň výkonu nastaveného na CW lasery 5, 10, 15, 30, a 40 dBm. Na FSO komponente som nastavil vlnovú dĺžku na 1550 nm, priemer otvoru vysielačieho teleskopu na 5 cm , priemer otvoru prijímacieho teleskopu na 30 cm. Postupne som menil útlm na kilometer v závislosti na hmle.

Hustá hmla, viditeľnosť 50 m, útlm 315dB/km

Úroveň výkonu 5 dBm



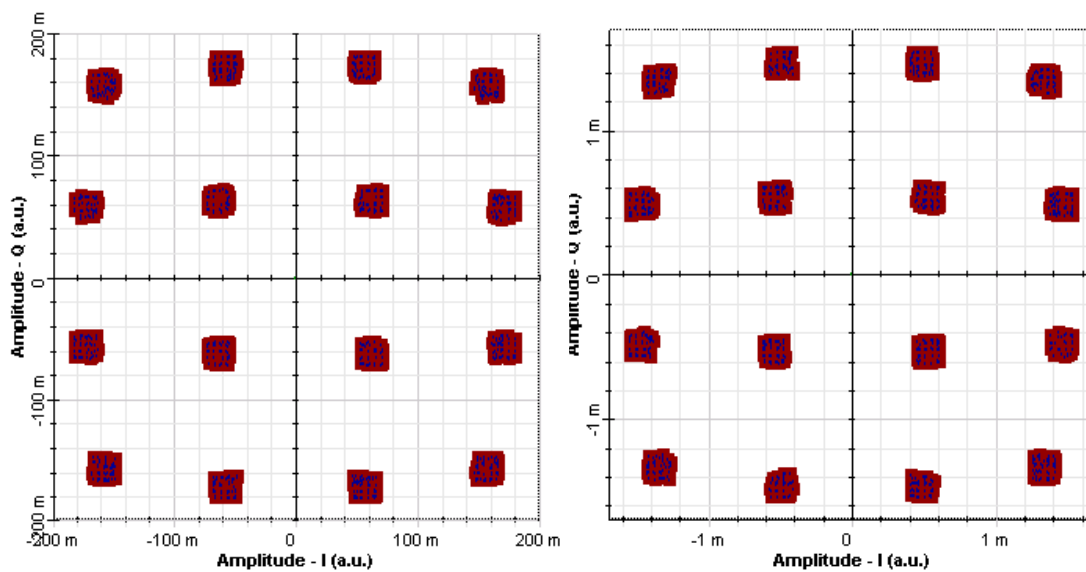
Obrázok 6.35: Konštalčné diagramy pre 50 m a 100 m.



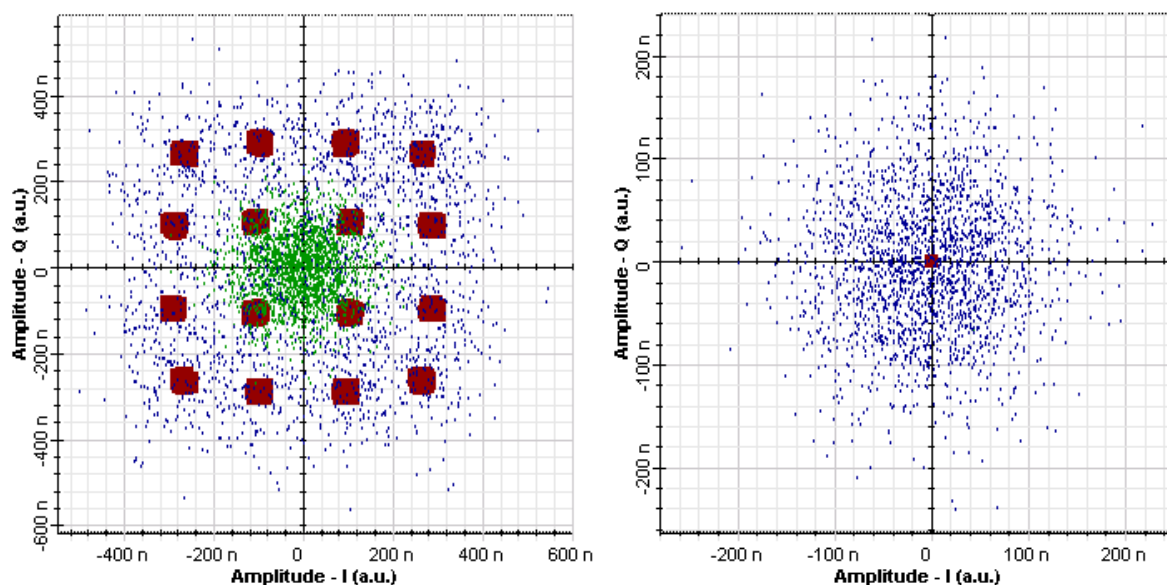
Obrázok 6.36: Konštalčné diagramy pre 110 m a 500 m.

Signál bol najkvalitnejší pri vzdialenosti 50 m. Pri 100 m je už signál zašumený a jednotlivé symboly sa začínajú spájať do jedného.

Úroveň výkonu 40 dBm

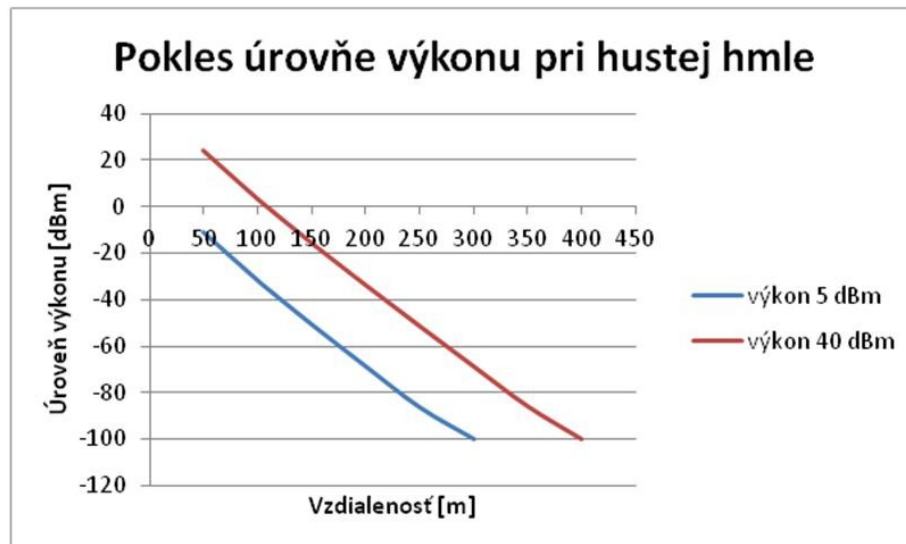


Obrázok 6.37: Konštalčné diagramy pre 50 m a 100 m.



Obrázok 6.38: Konštalačné diagramy pre 200 m a 500 m

Čo sa týka úrovne výkonu 40 dBm sú jednotlivé symboly pri vzdialenosti 100 m dostatočne viditeľné a signál je ešte dosť silný, ale po 100 m nastáva už zhoršenie signálu.

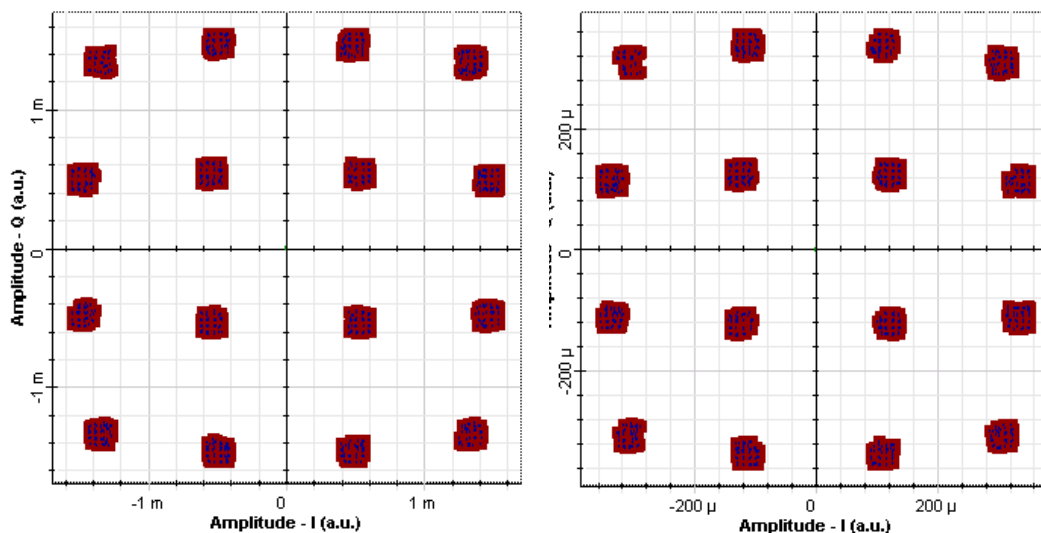


Obrázok 6.39: Graf utlmeného výkonu atmosférou.

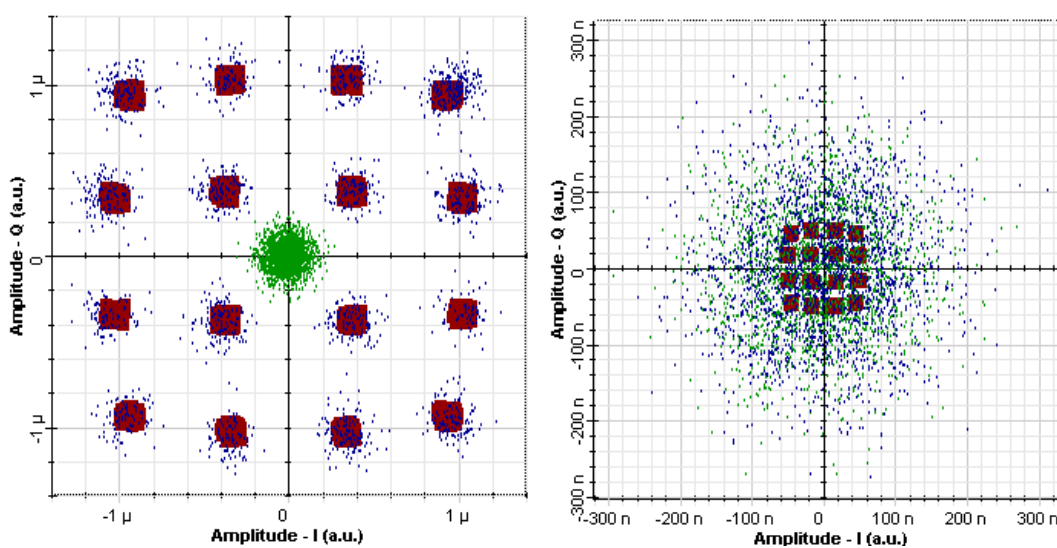
Pokles úrovně výkonu, ako je vidieť z grafu, je podobný ako u OFDM modulácie. Taktiež ako pri OFDM je maximálny nameraný pokles úrovně výkonu pri 40 dBm 400 m a pri 5 dBm 300 m, ale je tak zašumený, že sa už nedá použiť na prenos informácie.

Stredná hmla, viditeľnosť 500 m, útlm 28,9 dB.km⁻¹

Úroveň výkonu 5 dBm



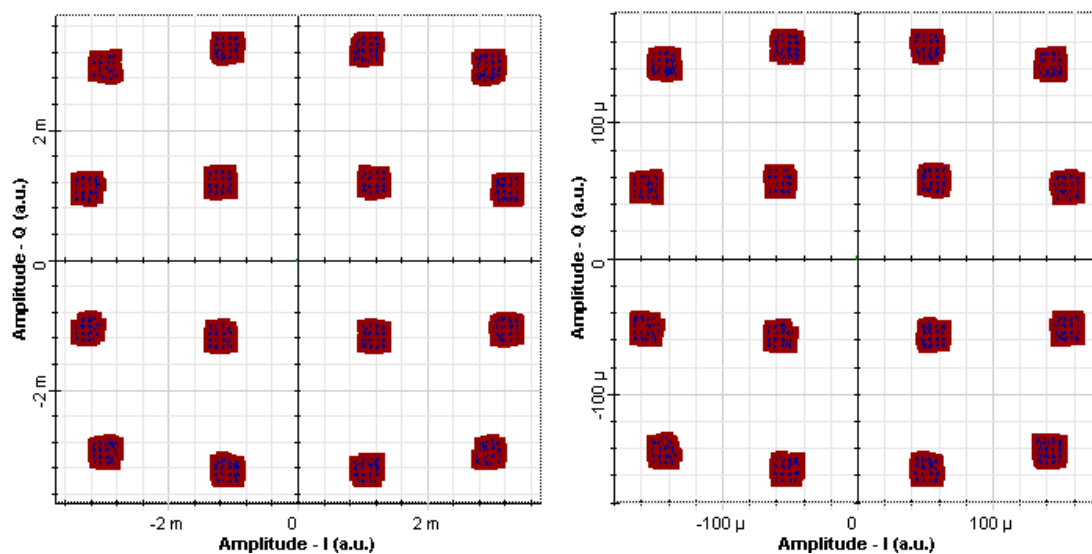
Obrázok 6.40: Konštalačné diagramy pre 50 m a 100 m.



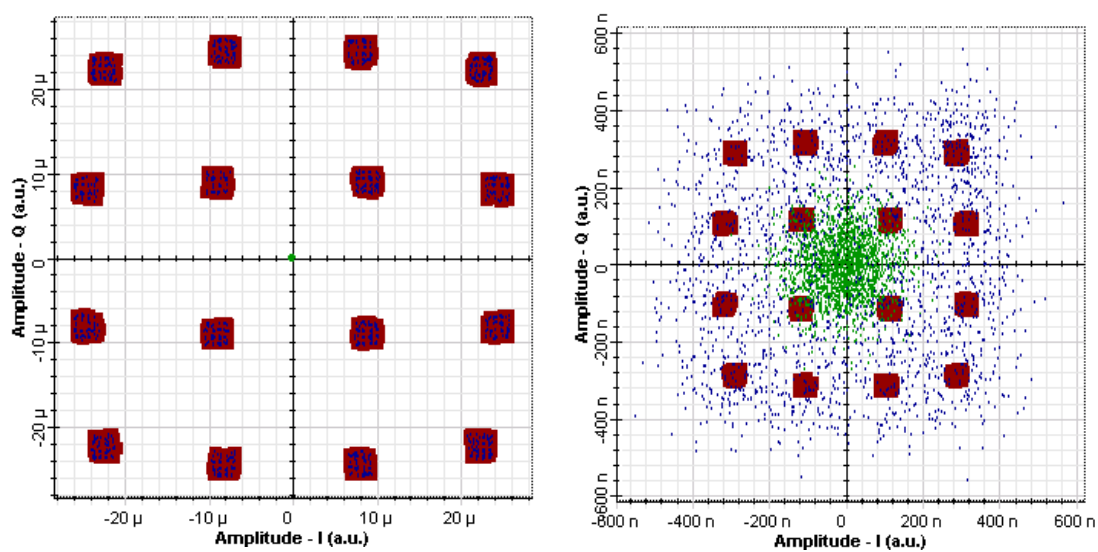
Obrázok 6.41: Konštalačné diagramy pre 500 m a 800 m

Degradácia signálu, kde sa signál začína zašumovať a jednotlivé symboly sa spájajú do jedného bodu nastáva pri 500 m.

Úroveň signálu 40 dBm

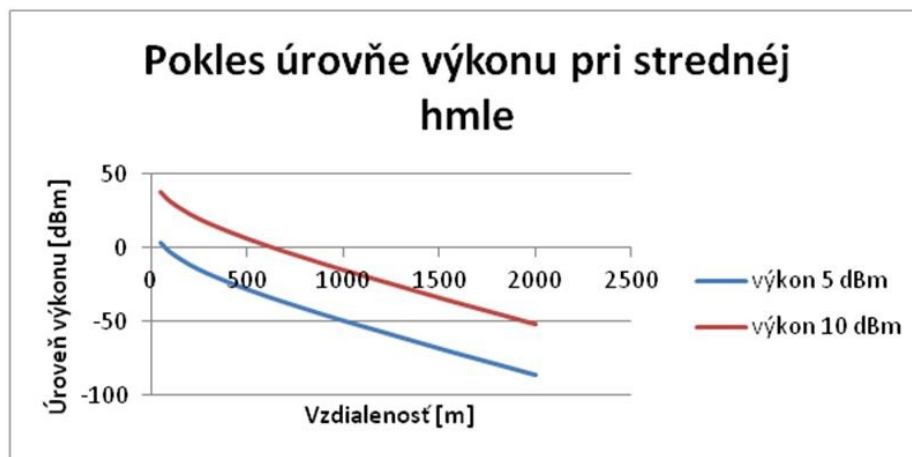


Obrázok 6.42: Konštalačné diagramy pre 500 m a 800 m.



Obrázok 6.43: Konštalačné diagramy pre 1000 m a 1500 m.

Pri nastavenej úrovni výkonu 40 dBm je signál silný aj pri 1000 m. Od 1000 m sa signál už zhoršuje.

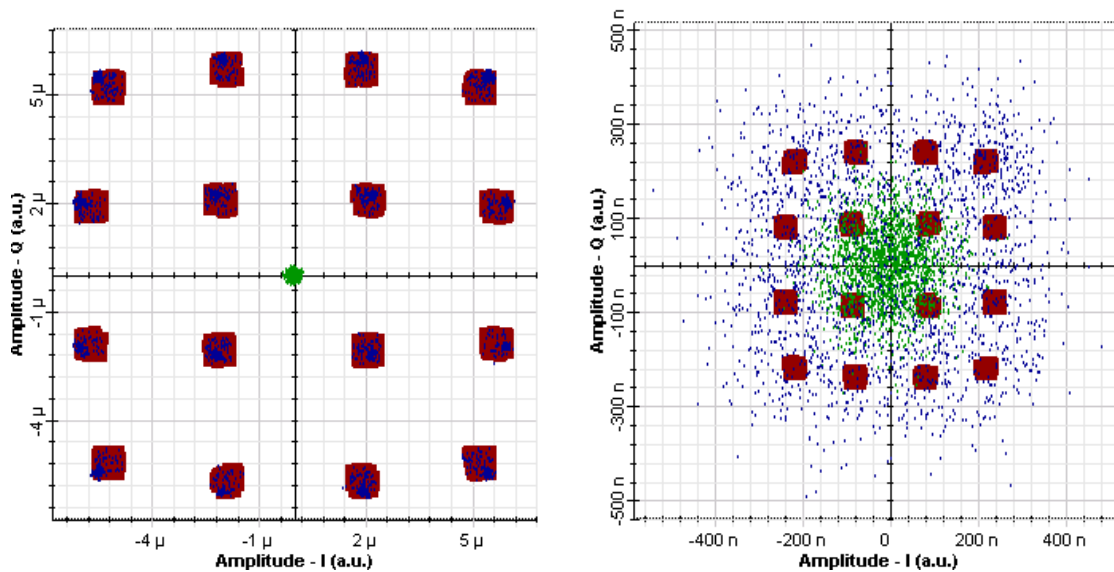


Obrázok 6.44: Graf utlmeného výkonu atmosférou

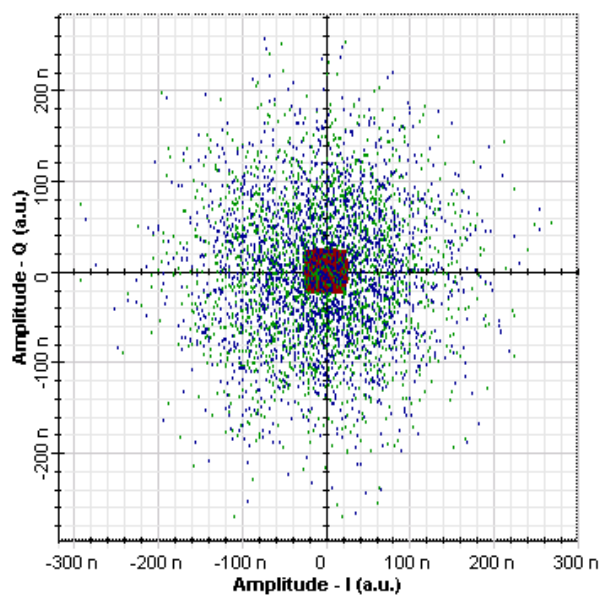
Z grafu vidíme, že pokles úrovne výkonu je priamoúmerný vzdialenosti. Čím je väčšia vzdialenosť tým je útlm prostredia silnejší.

Slabá hmľa, viditeľnosť 1000 m, útlm 14 dB.km^{-1}

Úroveň výkonu 5 dBm



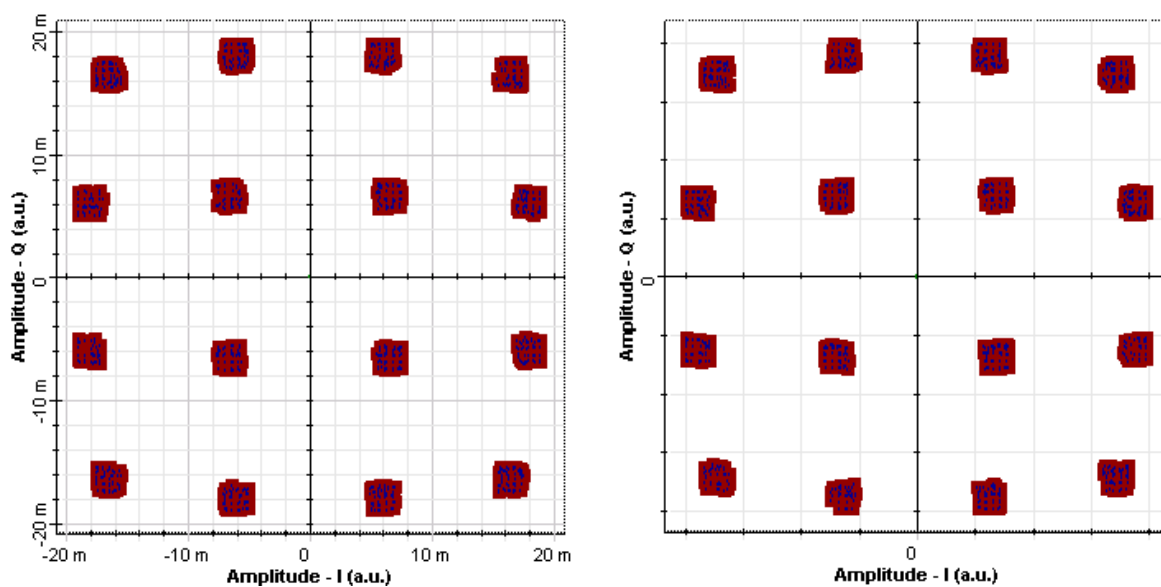
Obrázok 6.45: Konštalačné diagramy pre 500 m a 1000 m.



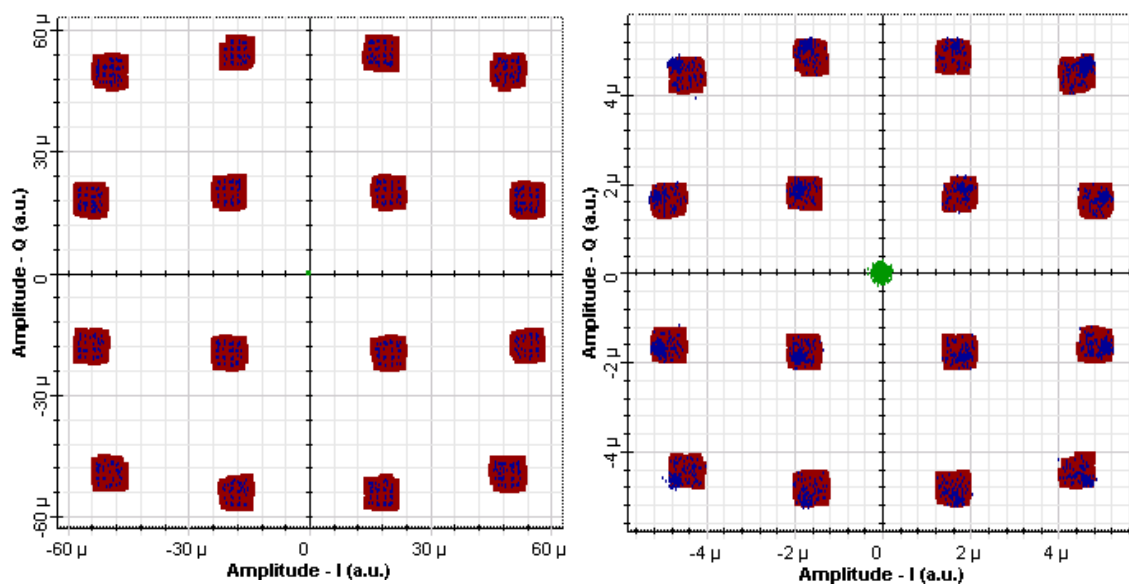
Obrázok 6.46: Konštalačný diagram pre 1500 m.

Pri slabšej hmle, kde je útlm 14 dB/km je signál silný a nedegradovaný na veľkú vzdialenosť pri nastavenej úrovni výkonu 5 dBm nemá signál taký dosah. Ako vidíme na konštalačných diagramoch pri vzdialenosti 1500 m je signál zašumený a nepoužiteľný na prenos informácie. Nedajú sa rozoznať jednotlivé symboly.

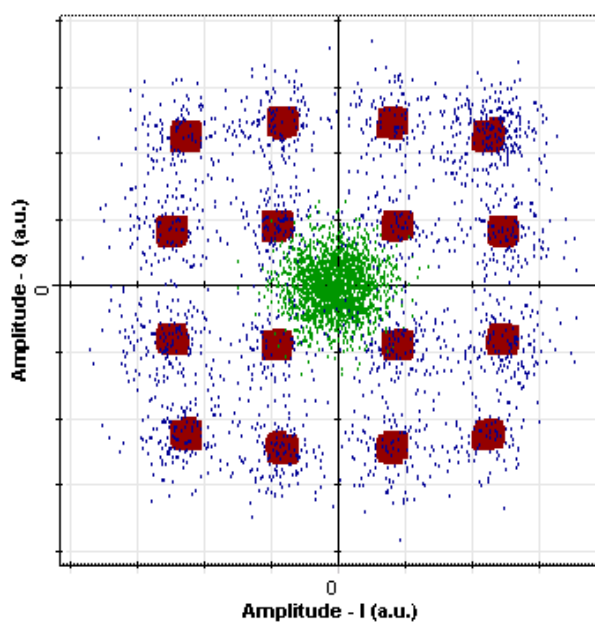
Úroveň výkonu 40 dBm



Obrázok 6.47: Konštalačné diagramy pre 500 m a 1000 m.

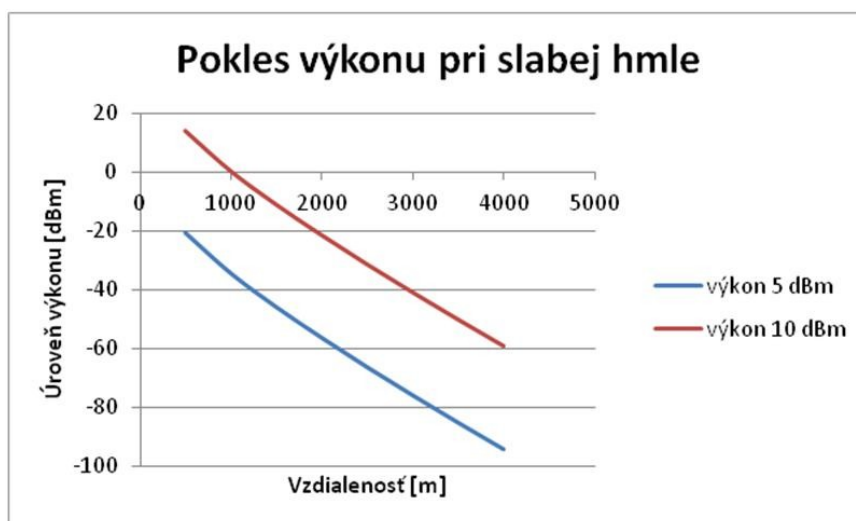


Obrázok 6.48: Konštalačné diagramy pre 1500 m a 2000 m.



Obrázok 6.49: Konštalačný diagram pre 2500 m.

Najlepšie výsledky boli dosiahnuté až pri úrovni výkonu 40 dBm. Použiteľná vzdialenosť, kde signál nebol ešte degradovaný bola 2000 m. Za vzdialenosťou 2000 m signál začal postupne degradovať.



Obrázok 6.50: Graf utlmeného výkonu atmosférou

Z grafu vidíme, že úroveň výkonu sa dala namerať aj za hranicou 4000 m ale výkon už bol nepoužiteľný pre prenos informácie.

7 Záver

Cieľom mojej bakalárskej práce bolo popísať a realizovať modulácie pre bezvláknový optický spoj v programe OptiSystem 11.0. V tomto programe som navrhol zapojenie pre OFDM a QAM modulácie. Na nasimulovanie atmosféry som použil FSO komponent na ktorom som nastavil vlnovú dĺžku 1550 nm, útlm prostredia podľa odpovedajúcej hmly, vzdialenosť od vysielacej až po prijímaciu časť, priemer vysielacieho teleskopu na 5 cm a priemer prijímacieho teleskopu na 30 cm. Následne som na CW lasery nastavoval úroveň výkonu 5, 10, 15, 30, 40 dBm, a vlnovú dĺžku 1550 nm. Pre každú nastavenú úroveň výkonu a pri rôznych vzdialenostiach som meral pokles úrovne výkonu pri prechode signálu hmlou a zaznamenával jednotlivé konštalačné diagramy. Merač optického výkonu bol umiestnený hneď za FSO komponentom. Tieto merania som opakoval aj pre QAM moduláciu.

Pri simuláciách som zistil, že najväčší útlm pre bezvláknový optický spoj predstavuje atmosférický dej - hmla. Je to spôsobené tým, že čiastočky hmly sú malé v porovnaní s vlnovou dĺžkou. Dochádza k Raileghuvmu rozptylu. Je to horšie ako u dažďa, kde sú čiastočky väčšie ako vlnová dĺžka.

Najväčší útlm nastal pri hustej hmle, ktorá ma útlm 315 dB.km^{-1} . Do 50 m (obr. 6.14) je signál použiteľný pre prenos informácie, po 100 m (obr. 6.14) je už útlm tak silný, že sa signál začína zhoršovať. Po 200 m už nejde rozoznať jednotlivé symboly OFDM modulácie. Ak chceme dosiahnuť väčšie vzdialenosti i u takto silnej hmly musíme nastaviť veľký vysielací výkon.

U strednej hmly s útlmom 28.9 dB.km^{-1} už signál dosahuje na väčšiu vzdialenosť. Pri tejto hmle už útlm nie je tak silný ako u hustej hmly. Pri nastavení dostatočnej úrovne výkonu, napríklad 40 dBm sa už dajú dosiahnuť vzdialenosti až 1500 m (obr. 6.22).

Pri slabej hmle je útlm najmenší, predstavuje 14 dB.km^{-1} . Pri nastavenej úrovni výkonu 5 dBm sa signál za hranicu 1000 m síce dostal ale bol veľmi slabý -33,349 dBm a jednotlivé symboly sa už nedali rozoznať. Pri úrovni výkonu 40 dBm a vyššej, šlo jednotlivé symboly rozoznať až do 2800 m. Táto slabá hmla nepredstavuje až taký problém pre bezvláknový optický spoj na vzdialenosti do 2800 m (obr. 6.27).

Z konštalačných diagramov (obr. 6.14, 6.19, 6.24) vidíme jednotlivú degradáciu signálu. Pri 50 m sú jednotlivé stavy rozmiestnené do odpovedajúcich kvadrantov a postupne nastáva zhoršenie, kde sa jednotlivé symboly začínú spájať do jedného.

U QAM modulácie boli namerané výsledky podobné. Pri hustej hmle (obr. 6.35) pri úrovni výkonu 5 dBm bol signál silný do vzdialenosti 50 m, pri vzdialenosti 100 m signál sa už zhoršuje, jednotlivé symboly sa spájajú do jedného a pri 500 m je signál tak zašumený, že jednotlivé symboly sa už vôbec nedajú rozoznať.

Čo sa týka slabej hmly (obr. 6.45) je signál silný aj pri vzdialenosti 500 m. Pri nastavenej úrovni výkonu 40 dBm (obr. 6.48) až do vzdialenosti 2000 m, potom sa signál začína zhoršovať.

Po porovnaní obidvoch modulácií som prišiel k záveru, že útlm hmly nemá vplyv na použitý typ modulácie, čo je následne vidieť z konštalačných diagramov. Hmla ovplyvňuje hlavne kvalitu signálu, rýchlosť prenosu a dosah.

8 Použitá literatura

- [1] FSONA: Technology. [online]. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: http://www.fsona.com/technology.php?sec=fso_guide
- [2] SHIEH, William a Ivan DJORDJEVIC. *OFDM for optical communications*. Amsterdam: Elsevier, 2010, xvi, 440 s. ISBN 978-0-12-374879-9.
- [3] Jak funguje kvadrurní amplitudová modulace - Internet pro všechny. [online]. [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://www.internetprovsechny.cz/jak-funguje-kvadrurni-amplitudova-modulace/>
- [4] DUFFEK, Luděk. *Modulátor QAM: QAM Modulator* [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008 [cit. 2013-04-27]. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/16966/QAM_modul%C3%A1tor.pdf?sequence=2. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Ing. Radim Číž.
- [5] DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. *Moderní radiotechnika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 767 s. ISBN 80-730-0132-2.
- [6] AGILENT TECHNOLOGIES. *Digital Modulation in Communications Systems: An Intruction* [online]. U.S.A, 2001 [cit. 2013-03-10]. ISBN 5965-7160E. Dostupné z: www.agilent.com/find/assist
- [7] Free Space Optics (FSO). [online]. [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.lightpointe.com/freespaceoptics.html>

9 Zoznam príloh

Súčasťou bakalárskej práce je CD.

Štruktúra na CD

/OFDM

 /hustá hmla

 /5dbm

 /10dbm

 /15dbm

 /30dbm

 /40dbm

 /stredná hmla

 /5dbm

 /10dbm

 /15dbm

 /30dbm

 /40dbm

 /slabá hmla

 /5dbm

 /10dbm

 /15dbm

 /30dbm

 /40dbm

/16 – QAM

 /hustá hmla

 /5dbm

 /10dbm

 /15dbm

 /30dbm

 /40dbm

 /stredná hmla

 /5dbm

 /10dbm

/15dbm
/30dbm
/40dbm
/slabá hmla
/5dbm
/10dbm
/15dbm
/30dbm
/40dbm
